

APPENDIX A

RELACIONES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS CON LAS AGUAS SUPERFICIALES DE LAS PORCIONES ALTAS DE LA SIERRA DE LAS CURCES Y SU RELACION CON LOS MECHANISMOS DE RECARGA DE LOS ACUIFEROS PRINCIPALES DEL VALLE DE MEXICO

RELACIONES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS CON LAS AGUAS SUPERFICIALES DE LAS PORCIONES ALTAS DE LA SIERRA DE LAS CRUCES Y SU RELACION CON LOS MECANISMOS DE RECARGA DE LOS ACUIFEROS PRINCIPALES DEL VALLE DE MEXICO.

(Groundwater surface relations in the highest parts of the Sierra de las Cruces as it pertains to recharge of main aquifers of Valley of Mexico).

ALEJANDRA CORTES
Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad
Universitaria, 04510, México.

L. RICARDO JAIMES-PALOMERA
Ingeniería Geológica Computarizada
Mayorazgo de Orduña No.8 Col. Xoco, 3330, México D.F. México,

ROBERT N. FARVOLDEN
National Grounwater Association
6375 Riverside Dr. Dublin, OH 43017.

RESUMEN

Con el fin de determinar las zonas de captación y régimen de flujo de los manantiales que ocurren en la Sierra de las Cruces, y de definir las zonas en que predomina la infiltración, se recabaron datos de 50 manantiales, y se realizaron trabajos de campo en las cuencas de captación de 10 de estos. Se interpretaron datos hidrométricos, isotópicos, químicos, y estructurales; para clasificarlos. Se realizó la caracterización química e isotópica de los manantiales principales. Se analizó la relación "contenido isotópico-altitud", con lo que se llega a definir el comportamiento hidrológico de las partes altas de la sierra. Se definen las zonas en que predomina la infiltración. Se concluye que la recarga ocurre en zonas altas de la sierra, que funciona como un sistema multiacuífero y las descargas tienen relación con el patrón estructural de la sierra.

ABSTRACT

In order to identify the catchment area and flow regime of springs that occurring in the highest parts of the Sierra de las Cruces, and to define the infiltration areas, 50 springs have been studied, and 10 springs of them are chosen for detailed investigations. The springs was clasified in function of: hydrograph type, chemical and isotopic content, and structural influence. Whiith these data was possible characterized groundwater discharge. An analysis of altitude vs O-18 content was considered. These results allow to identify and map recharge zones, and to define the nature of the groundwater discharge. We conclude that: groundwater recharge occur only in certain zones of the entire summit portion of the Sierra de las Cruces; the groundwater in the range flow through a multilayered aquifer; and discharge have a good fit whiith the presence of main fractures.

INTRODUCCION

A lo largo de varios años, los hidrogeólogos e ingenieros hidráulicos, han considerado que la recarga de los acuíferos del Valle de México, proviene de la infiltración del agua de lluvia en las partes elevadas de las montañas que rodean a la Cuenca de México. De dichas sierras, la Sierra del Chichinautzin -localizada al sur de la Ciudad de México-, es la que a simple vista resulta más favorable para la recarga del agua subterránea, pues está conformada por rocas basálticas muy permeables. Las evidencias más notorias de la alta permeabilidad de las rocas de la Sierra del Chichinautzin, son la casi total ausencia de drenaje superficial y la gran profundidad a que se encuentran los niveles potenciométricos en la divisoria de aguas superficiales. De igual manera, se tienen evidencias de que el resto de la recarga, proviene de las demás sierras que rodean la Cuenca, siendo una de las principales por su cercanía a la Ciudad de México, la Sierra de las Cruces, con su gran cantidad de corrientes perennes y manantiales que escurren hacia la Cuenca de México.

El modelo de flujo de aguas subterráneas empleado por Ortega y Farvolden (1989) para la Cuenca de México, considera que existe recarga en las porciones altas de la Sierra de las Cruces. Sin embargo este modelo es bueno como modelo conceptual para probar los rasgos generales del sistema de flujo de la cuenca, pero para conocer los mecanismos locales, se hace necesario realizar estudios más detallados, que permitan afinar dicho modelo.

El presente trabajo nace de la hipótesis de que varias corrientes y manantiales de las porciones altas de la sierra, son evidencias de que al menos en porciones de algunas de estas regiones, el agua que se infiltra, no contribuye a la recarga del sistema acuífero, pues es descargada localmente en partes todavía relativamente altas de la sierra. Este trabajo tiene por objeto, investigar lo que ocurre realmente en dichas regiones y su influencia en la recarga del sistema acuífero de la Cuenca de México.

El Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, en colaboración con la Universidad de Waterloo de Canadá, como parte de la última fase del Macroproyecto Acuífer Development, auspiciado por el International Development Research Center del Gobierno Canadiense, inició esta investigación, que es la continuación de otras que se han realizado en la Sierra de las Cruces. En este trabajo se presentan los resultados finales.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Determinar las zonas de captación y régimen de flujo de los manantiales que ocurren en la Sierra de las Cruces, con el fin de definir las zonas en que predomina la infiltración.
- Caracterizar las aguas subterráneas química e isotópicamente
- Definir las zonas de infiltración que requieren protección

La Sierra de las Cruces, constituye el límite poniente de la Cuenca de México, en cuya porción meridional se ubica la Ciudad de México, una de las ciudades más pobladas del mundo. El sistema acuífero de la citada cuenca, cuenta con recursos hidráulicos subterráneos enormes, pues casi el 70% de los 66 m³/s requeridos para

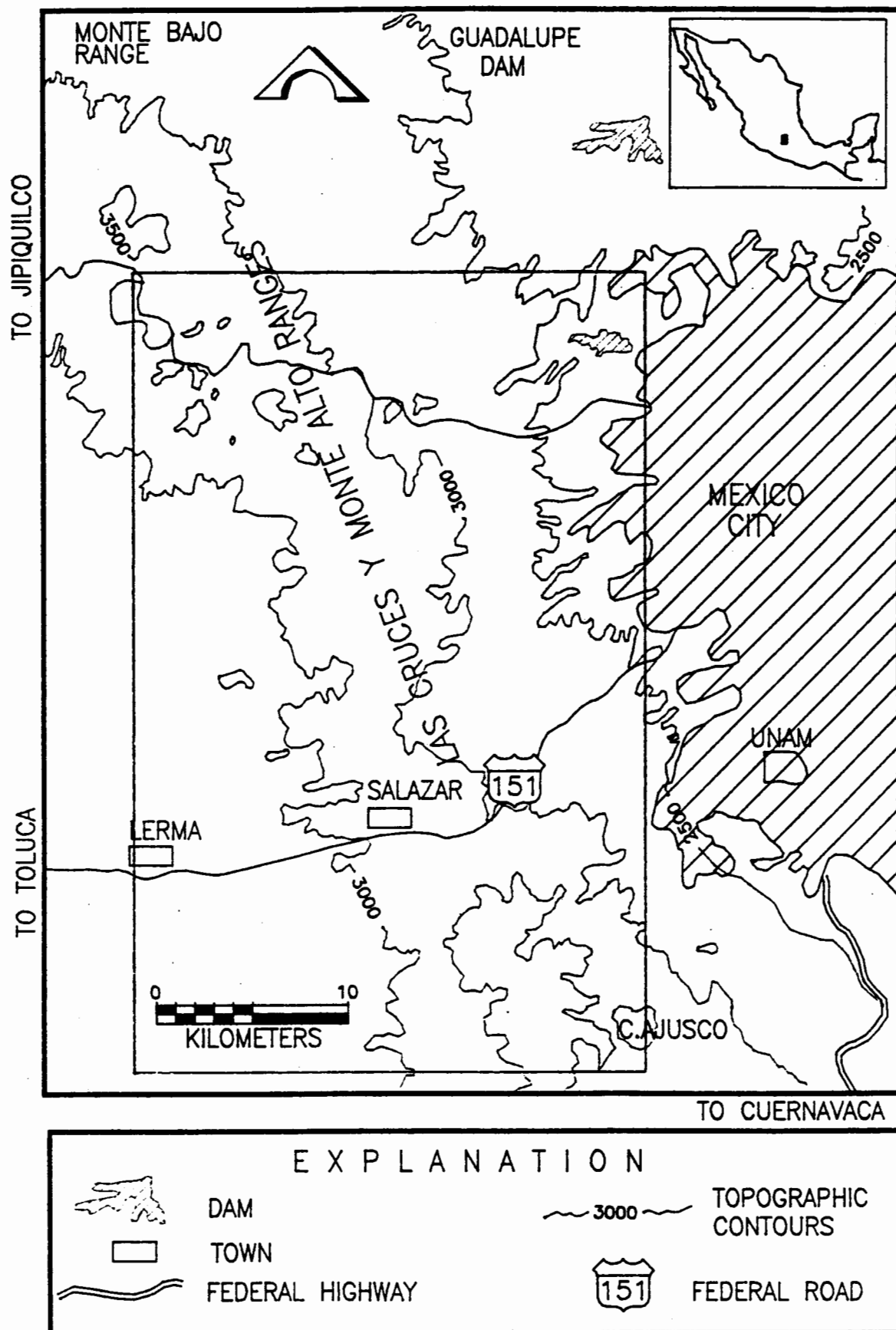


FIGURE 1 GENERAL LOCATION MAP

abastecer una ciudad de casi 20 millones de habitantes, proviene del subsuelo de la cuenca. Por tal motivo, es fundamental conocer los mecanismos de recarga del sistema acuífero.

El área estudiada, con extensión de 1423 Km², comprende las porciones altas y medias de la Sierra de las Cruces y Monte Alto, misma que se encuentra delimitada por las coordenadas geográficas 19° 10' a 19° 35' de latitud norte y 99° 15' 99° 32' 30" de longitud oeste. La Sierra de las Cruces forma parte de la Faja Volcánica Mexicana.

Marco geológico y estructural

La Sierra de las Cruces se constituye por la alineación de 4 estratovolcanes del Plioceno Tardío al Pleistoceno, cuyas edades varían de lo más antiguo a lo más reciente de norte a sur como lo demuestran los fechamientos isotópicos que han sido efectuados (Mora et. al, 1991). En el área cartografiada, se han definido 8 unidades litoestratigráficas relacionadas con las rocas volcánicas de la sierra (Vázquez y Jaimes, 1989; Jaimes, en prep.). Dichas unidades litoestratigráficas, son de lo antiguo a lo reciente (figura 2): Las rocas extrusivas de posible edad miocénica (Tmv), que están compuestas por secuencias volcánicas antiguas (lavas, brechas volcánicas y tobas); Rocas volcánicas del Plioceno Temprano (Tpv), conformadas por tobas y lavas interestratificadas; La Formación Otomí del Plioceno Tardío (Tpo), que está compuesta por las secuencias eruptivas del volcán más antiguo de la Sierra (lavas andesíticas, depósitos piroclásticos, brechas volcánicas, tobas y conglomerados); la Formación Las Cruces (Tpc) del Plioceno Tardío al Pleistoceno, que agrupa las rocas formadas por la erupción de los otros tres volcanes, consiste en secuencias de depósitos piroclásticos, brechas volcánicas y lavas); las rocas volcánicas andesíticas del Ajusco (Qpa) del Pleistoceno, están formadas por lavas, domos y piroclásticos; el Grupo Chichinautzin (Qc) del Pleistoceno al Holoceno, está compuesto principalmente por basaltos cavernosos y fracturados con intercalaciones de tefra; el material aluvial (Qal), está formado por arenas y gravas mal clasificadas; los depósitos lacustres, están constituidos por sedimentos finos (arcillas y limos), cenizas volcánicas alteradas y suelos diatomáceos.

Las relaciones estratigráficas de estas unidades pueden verse de manera esquemática en la figura 4.

Desde el punto de vista estructural, la Sierra de las Cruces, es el conjunto de dos alineamientos tectónicos que siguen la misma dirección (N40W), pero que se encuentran separados entre sí por una distancia de 5 km hacia el SW.

El primero de estos, se manifiesta en el alineamiento de la zona de emisión del volcán de Montealto (Tpo en la figura 2), con el cráter del primer volcán de la Formación Las Cruces (Tpc), mientras que el segundo se manifiesta por el alineamiento de los cráteres de los dos volcanes meridionales de la Formación Las Cruces.

Estos alineamientos, se manifiestan también en las fallas normales principales del área estudiada. Adicionalmente a lo anterior, el análisis estadístico de los polos de todos los lineamientos fotointerpretados, apoya la hipótesis de que esta orientación es la principal, como puede verse en la figura 3.

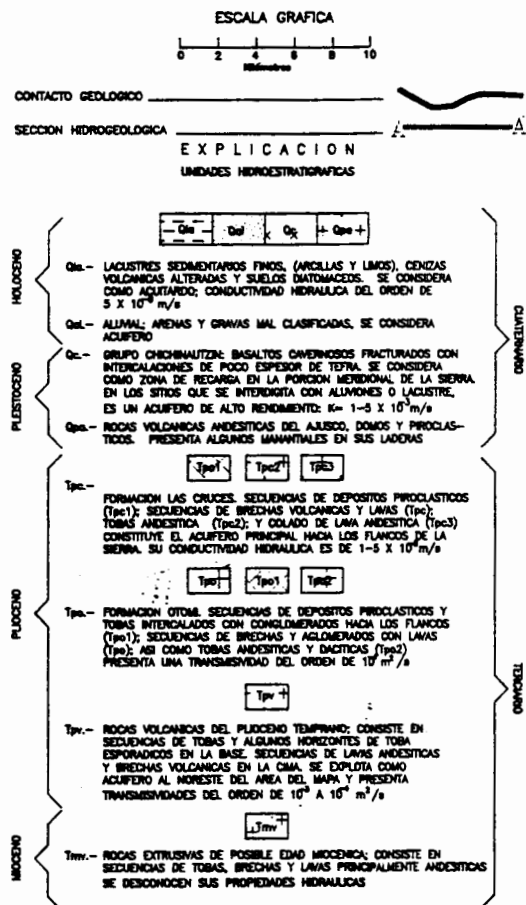
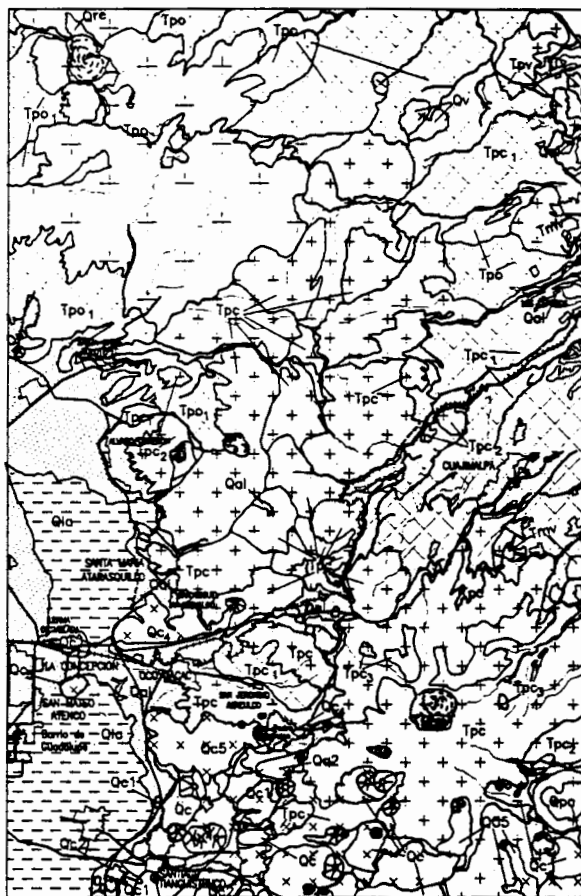


FIG 2 MAPA HIDROGEOLOGICO

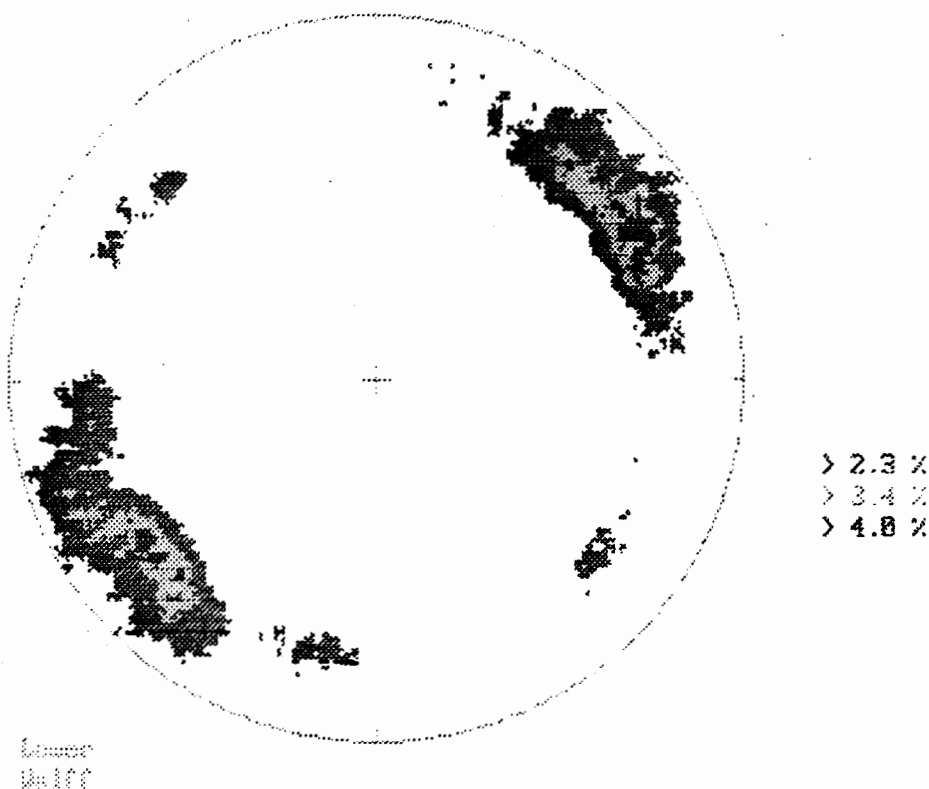


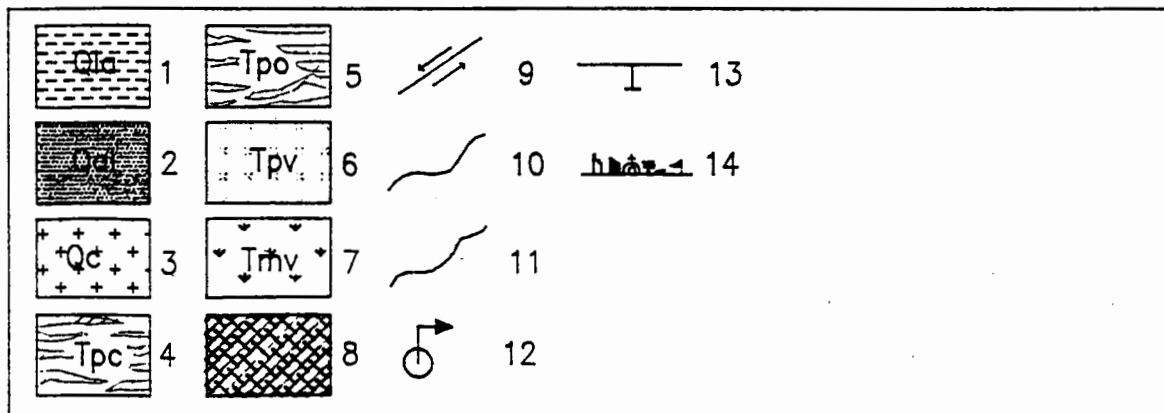
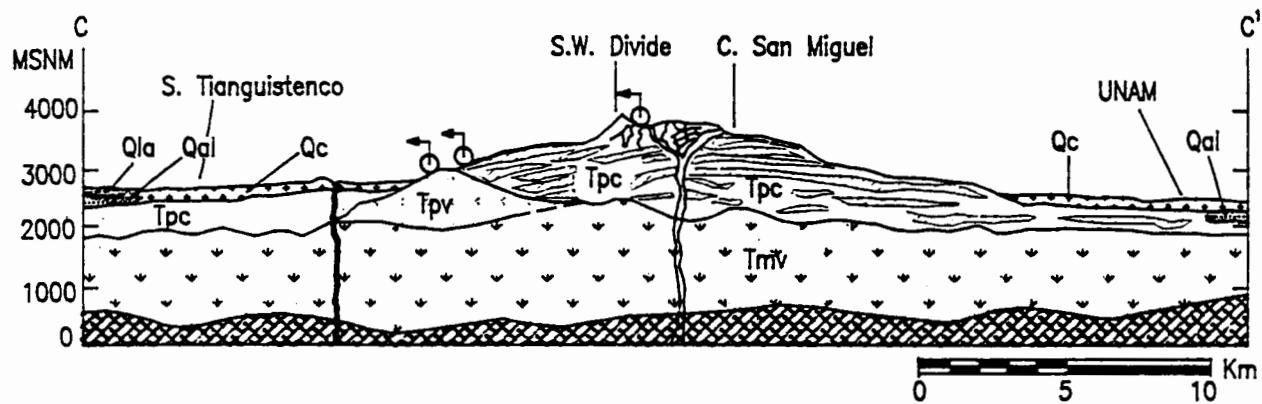
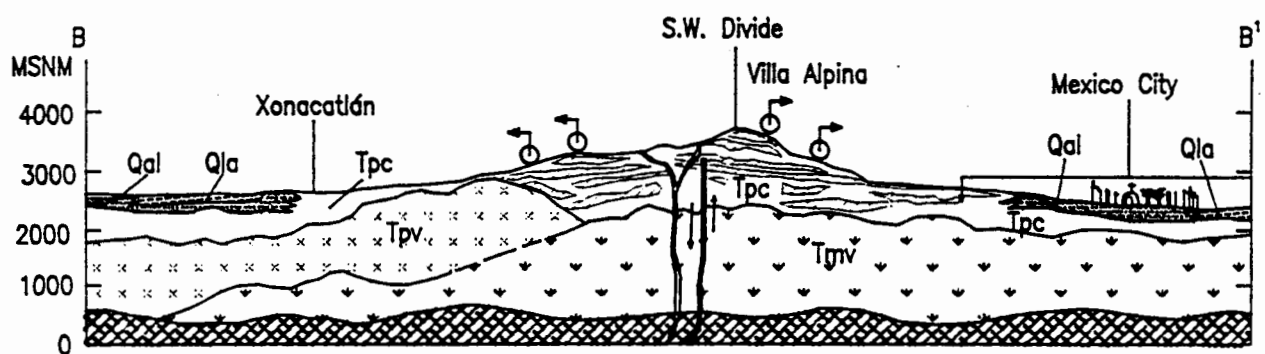
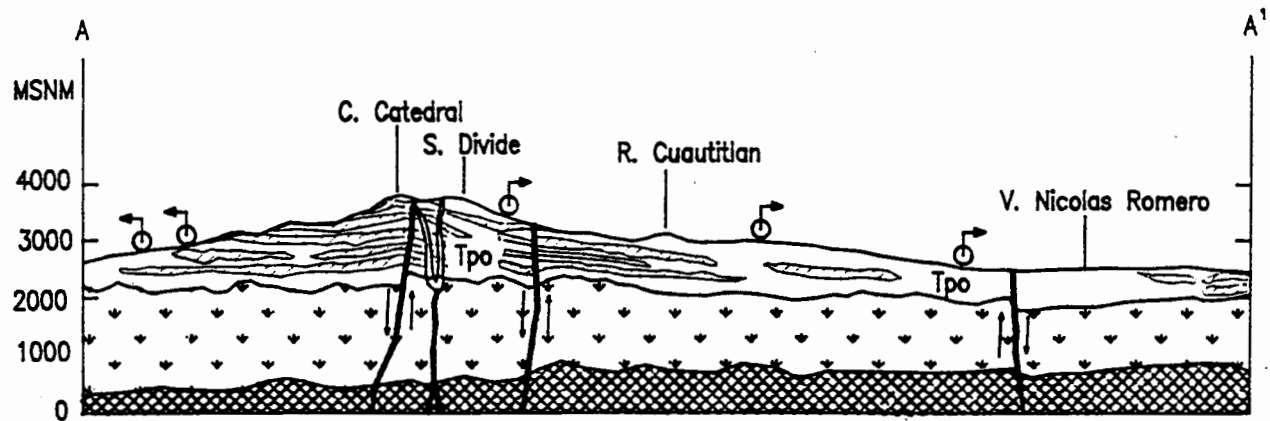
Figura 3 Diagrama de concentración de polos de los lineamientos (fracturas maestras y fallas) de la Sierra de las Cruces.

El funcionamiento de la Sierra de las Cruces de manera regional en dos dimensiones, fue establecido por Ortega y Farvolden (1989), en un modelo que considera la divisoria de aguas subterráneas desplazada hacia el valle de Lerma en el flanco occidental, de modo que el 70% del agua que se infiltra en esta sierra, alimenta al sistema acuífero de la Cuenca de México. Se consideran a las rocas fracturadas con conductividades hidráulicas del orden de 10^{-4} a 10^{-8} m/s y la red de flujo resultante del análisis computacional, indica que la recarga ocurre en las partes altas de la sierra y la descarga en la zona lacustre.

Los resultados de las observaciones de campo nos permiten definir la siguiente hidroestratigrafía de la Sierra de las Cruces en orden ascendente de lo más antiguo a lo más reciente (figuras 2 y 4):

Rocas extrusivas de posible edad miocénica

Estas rocas solo afloran en pequeñas porciones al oriente del área, pero se encuentran ampliamente extendidas en el subsuelo con espesores hasta de 500 m, como se encontró en la geología realizada por Vázquez y Jaimes (1989). Su interés hidrogeológico radica en que se tienen evidencias de que en los pozos profundos del DDF (800 a 1500 m), estas rocas son acuíferas y de acuerdo con las redes de flujo de Ortega y Farvolden, reciben recarga de la Sierra de Las Cruces.



Rocas volcánicas del Plioceno Temprano

Estas rocas solo se presentan en el límite nororiental del área de estudio y consisten de secuencias de tobas y lavas andesíticas que son acuíferas, pues los pozos que captan la cima de esta unidad en dicha área, presentan transmisividades del orden de 10^{-3} a 10^{-4} m/s²

Secuencias Piroclásticas de las Formaciones Otomí y las Cruces

Esta unidad consiste en secuencias de piroclásticos, que afloran en los flancos de las Sierra y que presentan numerosas heterogeneidades debidas a su naturaleza volcánica explosiva. En la porción norte (Tpo1), presentan intercalaciones de conglomerados, mientras que en la porción sur (Tpc1) son más permeables y forman una buena parte del acuífero en explotación en el sur de la Cuenca de México. La cima de esta unidad, tanto en el norte como en el sur, presenta capas de ceniza vítrea palagonitizada de 2 a 20 m de espesor de baja permeabilidad, misma que en las zonas desprovistas de bosques, forma una capa impermeable, que favorece el escurrimiento y obstaculiza la infiltración. La transmisividad de esta unidad en la porción norte, es del orden de 10^{-4} m²/s, en tanto que en la porción sur, la transmisividad es del orden de 10^{-3} m²/s

Secuencias de lavas y piroclásticos de las formaciones Otomí y las Cruces (Tpo, Tpc).

Esta unidad es la que reviste mayor interés para este trabajo, pues en ella se presentan gran parte de los manantiales de la sierra. Se considera que, de acuerdo a su posición topográfica, características climatológicas, y tipo de suelo, es la zona más favorable para que ocurra la infiltración. Su carácter hidrogeológico es el de una unidad en la que se presentan intercalaciones de medios fracturados (lavas andesíticas) y medios granulares (brechas volcánicas, y depósitos piroclásticos), con abundantes heterogeneidades; aspecto que se ve manifestado por la presencia de varios tipos de manantiales como se describe más adelante.

Grupo Chichinautzin (Qc)

Esta unidad está formada por basaltos cavernosos fracturados intercalados con estratos de ceniza de poco espesor. Estas rocas conforman la unidad más permeable presente en el área. En ella, son muy escasos los manantiales, pero es un acuífero importante, pues de estas rocas se extrae una gran proporción del agua subterránea de la porción meridional de la Cuenca de México. Su función como zona de recarga, es indiscutible, por la ausencia de corrientes superficiales y la gran profundidad del nivel potenciométrico. Se le asigna una K de 10^{-3} m/s.

Depósitos aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales cubren o en ocasiones se interdigitan con los depósitos piroclásticos. Están constituidos por depósitos de grava y arena, que son producto del acarreo por agua de las materiales piroclásticos. En algunos sitios, también se encuentran interdigitados con los depósitos lacustres. Esta unidad se considera como parte del acuífero principal de la Cuenca de México y sus transmisividades son del orden de 10^{-3} m²/s.

Depósitos lacustres

Estos depósitos forman un acuitardo cuyas características físicas son bien conocidas por los especialistas en geotécnia, pues sobre este material se levantan la mayoría de las edificaciones de la Ciudad de México.

La pérdida de volumen de esta unidad, en gran parte causada por la fuga de agua hacia el acuífero, provoca hundimiento en la Ciudad.

En el área de estudio, esta unidad solo se presenta en la porción sudoccidental -en el valle de Lerma-. Su conductividad hidráulica es del orden de 10^{-9} m/s.

METODO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo los objetivos de este trabajo, primeramente se realizó una interpretación de fotografías aéreas escala 1:40 000, mismas que cubren toda la superficie cartografiada, en ellas se complementó el trabajo de geología hasta definir todas las unidades que se encuentran en el área; se fotointerpretaron todas las fracturas maestras y fallas observables y se vaciaron los datos en un mapa escala 1:50 000, mismo que sirvió de base para los mapas aquí presentados. Las aportaciones a la geología de la Sierra de las Cruces obtenidas al realizar este trabajo, se presentan parcialmente cuando son necesarias para los fines del mismo, pero la descripción detallada de ellas será objeto de otro artículo.

Al iniciar el trabajo se contaba con los datos y experiencia obtenida de los trabajos realizados previamente en la Sierra de las Cruces por el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM en colaboración de la Universidad de Waterloo (Cortés y Farvolden, 1989; Cortés et.al, 1989a; Cortés et.al, 1989b; Jaimes et. al., 1989; Jaimes, 1991).

El trabajo de campo, estuvo encaminado a la identificación de las características hidrogeológicas de los manantiales y a obtener muestras para el análisis de isótopos ambientales ^{18}O y ^2H en dos etapas, la primera realizada entre 1990 y 1991 con fines de identificación, y la segunda, en 1992 para observar algunos manantiales con datos hidrométricos. Se hicieron también recorridos de verificación hidrogeológica en los que se observaron las características de las unidades que afloran en el área de estudio.

En cada manantial visitado se determinó lo siguiente:

- situación hidrogeológica
- tipo de suelo
- tipo de vegetación
- descripción geológica
- caudal
- altitud
- presión atmosférica
- temperatura del ambiente
- temperatura del agua
- conductividad eléctrica
- pH
- carácter hidrológico de la corriente formada (perenne, efluente o influente).

Al contar con los datos antes mencionados, se realizó una clasificación de los manantiales de acuerdo con las existentes en la literatura, se interpretaron los datos isotópicos y fisicoquímicos ya existentes, y se realizó un análisis de la relación de los manantiales con las estructuras geológicas.

Con los datos aportados por el análisis anterior, fué posible llegar a una clasificación de los manantiales de la Sierra de las Cruces, de acuerdo con sus condiciones hidrogeológicas, hidroquímicas y carácter hidrológico. El objetivo de dicha

clasificación, fué el de determinar la relación de los manantiales con la recarga al sistema acuífero de la Cuenca de México.

Por último, se realizó una estimación gruesa de la recarga en las partes altas de la sierra considerando los resultados obtenidos en este análisis y aplicando un método que se propone aquí, dadas las características de la Sierra.

RESULTADOS

Existen varias clasificaciones de manantiales, que obedecen a distintos criterios que van desde el caudal hasta la composición química, de las cuales, se eligieron dos de las más conocidas para ubicar los manantiales de la sierra en el contexto general.

En la tabla I se presentan los manantiales de la sierra clasificados de acuerdo con la clasificación de Tolman, la de Meinzer y a la que se llegó con base en lo observado.

Manantiales Tipo

Para conocer la relación de los manantiales con el funcionamiento del sistema, se propone un método de clasificación basado en seis manantiales tipo, mismos que cubren todas las posibilidades de descarga natural observadas en la Sierra de las Cruces. Estos manantiales tipo, al considerar su origen, permiten hacer generalizaciones sobre el comportamiento de la descarga.

En la figura 5 se encuentra la localización de los manantiales en relación con la orografía, y en la figura 6, se muestran esquemáticamente los seis manantiales tipo de la Sierra, mismos que se describen a continuación:

Tipo 1

Manantiales por disección del relieve; que brotan al ser descubierto el contacto de rocas de distinta permeabilidad, como el caso de lavas fracturadas y piroclásticos.

Tipo 2

Manantiales en suelos de las partes altas de la sierra; son característicos de las porciones altas de la sierra, generalmente boscosas, en las que el suelo presenta tubificaciones en las que se almacena y fluye el agua subterránea, como se ha comprobado en cuencas arboladas de climas húmedos de otras partes del mundo (McDonnell, 1990).

En la sierra, estos manantiales generalmente se manifiestan en zonas donde se encuentran saturadas también las capas inferiores, que generalmente son depósitos piroclásticos o rocas, situación que ocurre en pequeñas cuencas de las partes altas de la sierra.

Tipo 3

Manantiales debidos a la presencia de fallas o fracturas; que son los más extendidos en la sierra aunque en la mayor parte de las veces se encuentran relacionados con otros manantiales tipo, dada la influencia de las estructuras en la ocurrencia de los mismos.

Tipo 4

TABLE I

CLASIFICACION DE MANANTIALES DE LA SIERRA DE LAS CRUCES

No.	NOMBRE	CAUD	ALTT	CONDICIONES HIDROGEOLOGICAS	CLASIFICACION TOLMAN	CLASIFICACION MEINZER	MANANTIAL TIPO SIERRA DE LAS C.
1	CHIMALPA	82.6	2750	Descarga de piroclásticos al río Borracho	1 y 2b	3	5
2	AGUA BENDITA	144.5	2700	Descarga al río Borracho	1 y 2b	3	5
3	AJOIOTES	42.2	3340	Fractura y contacto en secuencias del San Miguel	3 y 2b	3	6
4	A. DE PENAS	7.7	3350	Fractura y secuencia de lavas-brechas del San Miguel	3	4	6
5	P. DE LEONES	144.5	3450	Fractura en secuencias de piroclásticos	2b	3	3
6	TAZA VIEJA	87.1	3100	Contacto lava-piroclásticos	2b	3	1
7	EL PARTIDOR	130.1	3000	Contacto lava-piroclásticos y fractura	2b y 3	3	6
8	EL RANCHITO	328.2	2900	Contacto secuencias lavas-piroclásticos	2b	4	1
9	SAN MATEO T.	6.57	2650	Corte topográfico piroclásticos y fractura	1, 2b y 3	4	3
10	XOMETITLA	14.1	2800	Fractura y cambio de pendiente	3 y 1	4	3
11	SANTA ROSA X.	6.2	2730	Fractura cerca del contacto con rocas Tmv	3	5	3
12	SAN BARTOLO A.	75.3	2640	Contacto en secuencias de lavas y piroclásticos	2b	3	1
13	EL POTRERO	53.2	3100	Contacto lavas-piroclásticos	2b	3	1
14	CAJA LA ROSITA	87.6				3	
16	LAS PALOMAS	1.5	2870	Contacto lavas San Miguel-Piroclásticos	2b	3	4
17	OJO DE AGUA	2.8	3200	Contacto lava-piroclásticos-cambio de pendiente	2b y 1	3	1
18	CHICHICASPA	61.3	3000	Fractura en las secuencias lavas-piroclásticos	3	3	6
19	A. GRANDE	13.9	3401	Fractura-contacto lavas-piroclásticos	2b y 3	4	6
20	LA SAUCEDA	5.3	3330	Contacto Ajusco-Formación Las Cruces	2a	3	4
21	POT. CHICO	6.4	3370	Cuenca en el contacto las Cruces-Chichinautzin	3	4	4
22	VIVORILLAS	46.7	3480	Contacto Rocas-piroclásticos San Miguel	2b	3	1
23	MONTE ALEGRE	260.6	3300	Fractura en secuencias volcánicas superiores. Valle muy disectado	3	3	3
24	EL SAUCO	5.3	3390	Contacto lava-piroclásticos San Miguel	2b	3	1
25	RANCHO VIEJO	27.4	2980	Fractura en secuencias piroclásticas del San Miguel	3	4	6
26	PUENTES BROTAÑTES		2320	Fractura en el contacto lavas-piroclásticos Fm. Las Cruces	3	3	6
27	TULMIAC	1.65		En el Grupo chichinautzin	3	3	6
28	SANTA FE		2450	Cambio de pendiente o contacto de dos unidades de piroclásticos de distinta k	2b	3	4
29	VALLE CARBONERA		3060	Dissección de suelo y piroclásticos de calda			3
30	PERICOS		3000	Fractura en secuencias volcánicas			3
31	P. DE LEONES 2		3100	Contacto en secuencias de piroclásticos	2b		3
32	TUNEL DE MONTE ALEGRE		3500	Fractura en andesitas	3		3
33	POZO CASTAÑEDA 5		2330	Contacto de secuencias con unidades más antiguas			4
34	CUARTO DINAMO		3150	Contacto lavas piroclásticos	2b		1
35	EL ZARCO 1	0.5	2810	Valle formado en una fractura por dissección	3 y 1	8	3
35b	EL ZARCO 2	0.6		Valle formado en una fractura por dissección	3 y 1	8	3
36	PEÑA POBRE		2290	Contacto piroclásticos con colada del Xitle	3	3	4
37	VALLE DEL CONEJO		3200	dissección de suelo y piroclásticos de calda	1 y 2b	4	4
38	CIPRES OJO DE AGUA		2500	Fractura en tobas líticas de la Formación las Cruces	3	3	2
39	VIVORILLAS 1	0.1	3600	Contacto lava piroclásticos con cambio de pendiente	2b y 1	7	3
40	VIVORILLAS 2	0.56	3550	Contacto lava piroclástico, descarga a través del suelo	2b	7	1
41	MONTEALEGRE A	0.2	3300	Zona de rezume por dissección del relieve	1	7	2
42	MONTEALEGRE B	0.5	3400	Contacto brechas base de piroclásticos en freatofitas	2a	7	1
43	SAN FRANCISCO	1	2720	Corte por dissección en brechas volcánicas	1	3	3
44	EL GUARDA	0.25	2830	Cañada en el contacto de aglomerado brecha o lava-brecha	2b	8	1
45	RIO TLALNEPANTLA	0.2	2690	Fractura, dissección y contacto de dos unidades de dif. perm.	3, 1 y 2b	8	3
47	SANTA ANA	5	3250	Zona de rezume en contacto roca-piroclásticos	2b	5	2
48	PALOMAS M.A.	0.4	3360	Contacto cenizas volcánicas con roca	2a	6	2
49	DREN DE CARRETER	0.45	3048	Flujo "localizado" en una toba lítica (dren de carretera)		8	3
50	TOMA DE AGUA CAR	0.4	3085	Contacto en una zona permeable de dos tipos de piroclásticos		8	3

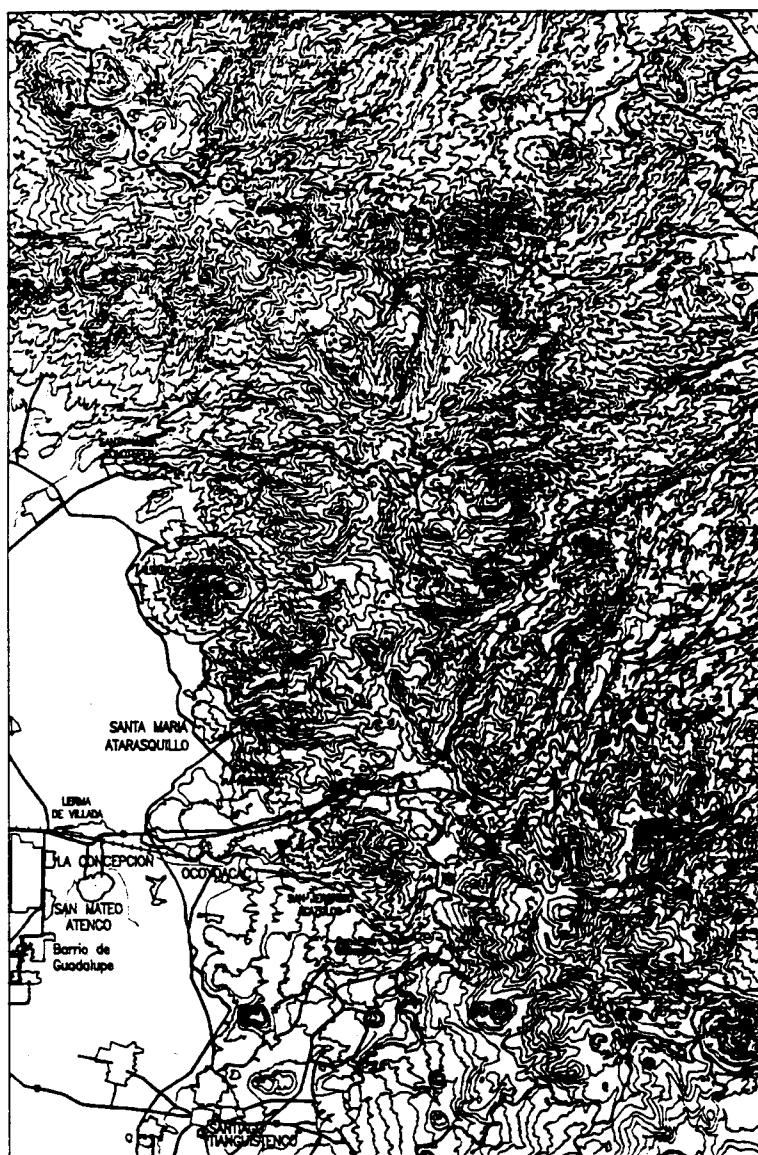
TABLA II CLASIFICACION DE TOLMAN (MODIFICADA POR HEALTH AND TRAINER, 1966)

	Tipo de roca	Situación geológica	Tipo de abertura	Carácter hidráulico	Manantiales representativos
1.	Formación permeable y gruesa de materiales como la grava o la arena no consolidados	cuerpo grueso en el que la ocurrencia de los manantiales no está influida por la formación subyacente	aberturas intergranulares principalmente primarias	el agua se encuentra libre	manantiales en pisos de los valles, a lo largo de la base de las paredes del valle o en los cantiles, en cortes de la pendiente en abanicos aluviales
(Nota. Los manantiales del grupo 1 por lo general ocurren en los romplimientos de la pendiente en los sitios en que el nivel freático alcanza la superficie del terreno)					
2a.	manantial en formación de capa permeable	Acuífero en capa de material permeable, por lo general inclinado, que descansa sobre un material impermeable	Aberturas intergranulares, principalmente primarias	el agua se encuentra libre	Manantiales debajo de mesas; límites inferiores de taludes y depósitos de deslizamiento de masas, o depósitos permeables superiores disectados por valles que alcanzan el material inferior impermeable; en fallas de presas
2b.	Formaciones interestratificadas permeables e impermeables	El acuífero es una capa de roca permeable-interestratificada con capas de roca impermeable	Aberturas intergranulares principalmente primarias	el agua se encuentra confinada por lo general	Manantiales a lo largo de los afloramientos (por lo general en la base de la formación) de arenisca interestratificada con lutita, o de arena y grava, o de grava con till, o de ceniza con lava, etc.
(Nota. Los manantiales del grupo 2 ocurren por lo general en el contacto entre materiales permeables y no permeables)					
3.	Rocas fracturadas	El acuífero en el cuerpo de la roca (generalmente roca dura) la cual transmite el agua parcial o enteramente a través de fracturas	fallas y fracturas *	agua confinada o libre	Manantiales que brotan del afloramiento de fallas, zonas de falla, o fracturas, o del suelo cercano a ellas.
4.	Rocas consolidadas solubles	El acuífero en el cuerpo de rocas fracturadas, relativamente solubles (generalmente rocas carbonatadas).	fallas y fracturas ampliadas	agua confinada o libre	manantiales que brotan en los canales disueltos en la caliza o dolomía
5.	Lava	Cuerpo del acuífero de rocas volcánicas intersectado por tubos de flujo, vesículas y fracturas.	tubos de flujo y otras aberturas *	agua confinada o libre	manantiales que brotan de los flujos de lava

* Las fracturas, aberturas intergranulares en ceniza, toba, en las vesículas, tubos de flujo, se presentan juntas en algunos terrenos volcánicos, por lo tanto los tipos de manantial no pueden ser identificados.

**TABLA III CLASIFICACION DE LA DESCARGA DE LOS MANANTIALES
(SEGUN MEINZER)**

Categoría	Unidades del S.I.
Primera	Superiores a 2.83 m ³ /s
Segunda	Entre 0.283 y 2.83 m ³ /s
Tercera	Entre 28.3 y 283 l/s
Cuarta	Entre 6.31 y 28.3 l/s
Quinta	Entre 0.631 y 6.31 l/s
Sexta	Entre 63.1 y 631 ml/s
Séptima	Entre 7.9 y 63.1 ml/s
Octava	Menores de 7.9 ml/s



ESCALA GRAFICA

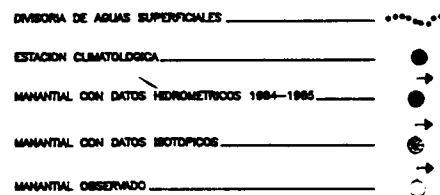
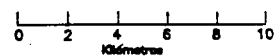
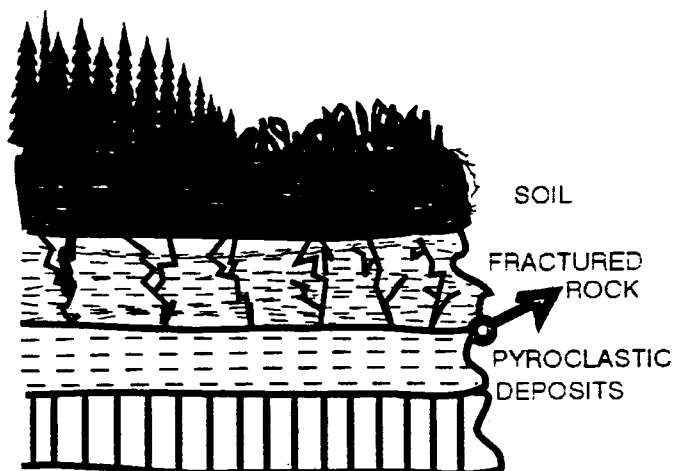
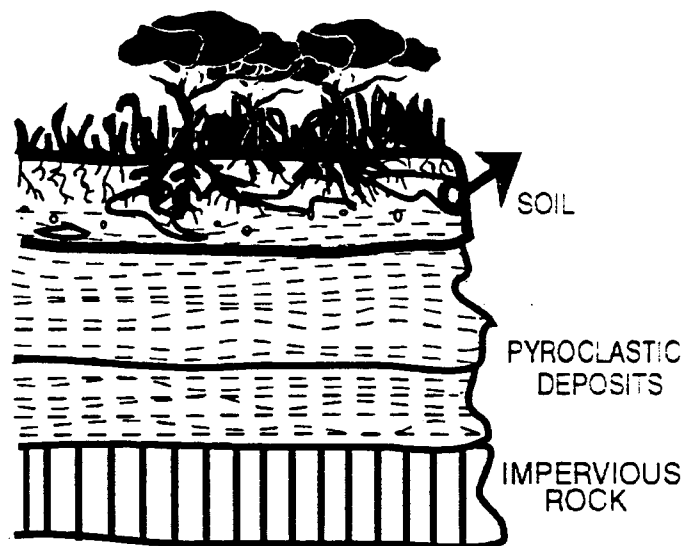


FIG. 5 MAPA DE LOCALIZACION DE MANANTIALES ESTUDIADOS.



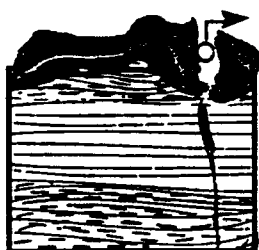
MANANTIALES POR DISECCION DEL RELIEVE
BROTAN EN EL CONTACTO DE ROCAS CON DISTINTA PERMEABILIDAD COMO LAVAS FRACTURADAS Y PIROCLASTICOS.



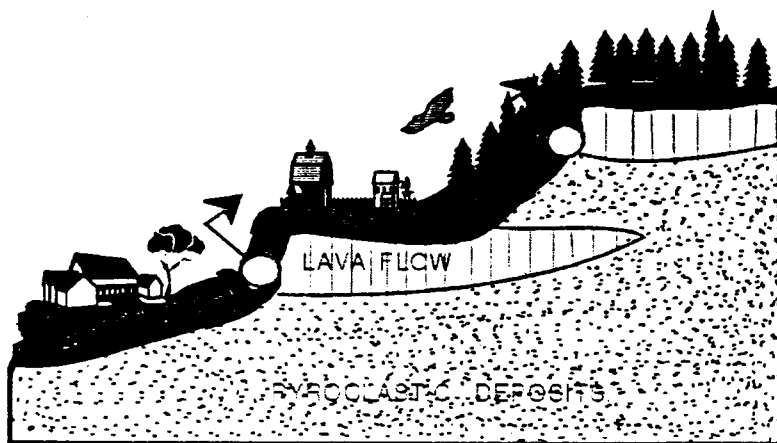
MANATIALES EN SUELOS DE LAS PARTES ALTAS DE LA SIERRA.
LA ROCA SE ENCUENTRA SATURADA DESDE EL SUBSTRATO IMPERMEABLE HASTA EL SUELO, DONDE APROVECHA CAVERNAS Y TUBIFICACIONES DEL MISMO PARA FLUIR Y EMERGER.



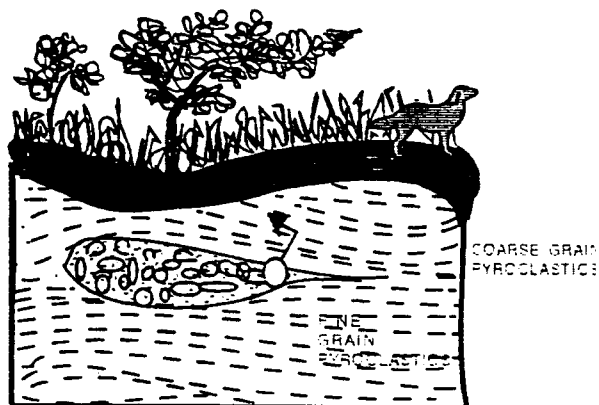
MANANTIAL POR FALLA. CONTRIBUYE TAMBIEN LA MENOR PERMEABILIDAD DE LOS PIROCLASTICOS.



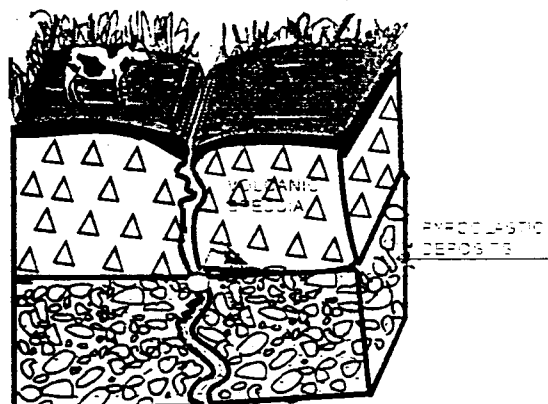
MANANTIAL SURGIDO POR LA DISECCION DE UNA FRACTURA.



MANANTIAL POR CONTACTO ENTRE DOS UNIDADES HIDROESTRATIGRAFICAS DISTINTAS.



MANANTIAL DENTRO DE UNA MISMA UNIDAD HIDROGEOLOGICA DEBIDO A LAS HETEROGENEIDADES LITOLÓGICAS DE LA MISMA



MANANTIAL POR CONTACTO HIDROGEOLOGICO Y POR FRACTURA.

TYPE OF SPRINGS IN SIERRA DE LAS CRUCES, MEXICO.

Manantiales por contacto entre dos unidades hidroestratigráficas distintas; en este caso se encuentran los manantiales que descargan rocas de unidades más permeables, por ejemplo los basaltos fracturados del Grupo Chichinautzin, sobre depósitos piroclásticos subyacentes, por citar un ejemplo muy claro, pero se presentan en otros contactos como el de las secuencias de lavas y piroclásticos sobre las secuencias de "solo" piroclásticos; y en el caso del contacto entre las secuencias de piroclásticos sobre las rocas volcánicas más antiguas.

Tipo 5

Manantiales dentro de una misma unidad hidrogeológica; que se deben por lo general a heterogeneidades dentro de una misma capa o conjunto de capas, en las que la permeabilidad es mayor que las colindantes, y que al disectarse por la erosión, dan lugar a manantiales.

Tipo 6

Manantiales debidos a la presencia tanto de una fractura, como un contacto hidrogeológico; este manantial tipo se considera para separar los manantiales que se deben exclusivamente a las estructuras, con los de origen combinado, que son muy comunes.

Figura 6. Manantiales de tipo 6. Manantiales de tipo 6. Manantiales de tipo 6.

Contenido isotópico

Se analizaron 9 muestras para isótopos estables (^{18}O y ^2H) en el laboratorio del Waterloo Centre for Groundwater Research, de la Universidad de Waterloo, mismas que se sumaron a las ya existentes (Cortés et. al, 1989a y Cortés et.al, 1989b). Estos datos isotópicos, los datos fisico-químicos recopilados y medidos en el campo se muestran en la tabla IV.

Para interpretar los datos de isótopos estables (^{18}O y ^2H), se empleó la curva meteórica local obtenida por Cortés y Farvolden (1989), para la Sierra de las Cruces, la gráfica de la relación Oxígeno-18 y Deuterio se presenta en la figura 7.

Las observaciones más relevantes de esta gráfica son:

1. El contenido isotópico es muy similar, quedando comprendidos dentro de un rango que va de -9.9 a -11.8 ‰ de O-18.
2. Se observa que las muestras 38, 23 y 24 tienen una ligera evaporación, aspecto que no es de extrañar dadas las condiciones en que se hace el muestreo en manantiales.
3. Las muestras en general se ajustan a la línea meteórica local.

Altitud vs Contenido isotópico

En la figura 8 se muestra la gráfica de la relación altitud vs contenido isotópico de O-18.

En esta gráfica es muy claro el efecto de altitud, que se manifiesta por una relación lineal entre el empobrecimiento en delta de O-18, con respecto al incremento de altitud, con lo que es posible interpretar lo siguiente:

-La recarga de los manantiales podría considerarse como cercana a su punto de afloramiento.

MANANTIALES CON DATOS ISOTOPICOS Y FISICO-QUIMICOS

No.	NAME	DISCH. l/s	ELEVAT.	TDS	COND	ToC	pH	O-18	D	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO	SO4	DATE
3	AJOLOTES	42.2	3340			9		-11.2	-75	5.5	1.8	0.7	1.4	1	37.7	5.6	Sep-88
6	TAZA VIEJA	87.1	3100	107.6		9		-10.8	-72	9	1.2	2.3		1.9	43.1	6.3	Sep-88
7	EL PARTIDOR	130.1	3000					-10.9	-74								Sep-88
8	EL RANCHITO	328.2	2900					-10.4	-73								Sep-88
13	EL POTRERO	53.2	3100					-10.9	-74								Sep-88
16	LAS PALOMAS	1.5	2870					-10.5	-72								Sep-88
17	OJO DE AGUA		3200					-10	-69								
20	LA SAUCEDA	5.3	3330	114		9		-11.6	-76	7.9	5.3	1.6	3.8	7.3	30.5		feb-87
23	MONTE ALEGRE	260.6	3300					-11.4	-81								Sep-88
24	EL SAUCO	5.3	3390	113		9		-11.1	-81	7.5	2.7	3.8	1.4	1.8	53.9	7.1	Sep-88
26	FUENTES BROTANTE		2320					-10.9	-71								
28	SANTA FE		2450	152.6		14		-9.7	-68	14.4	8.2	12	4.2	4	104.8	9.8	Sep-88
30	PERICOS		3000					-10.6	-71								
31	P. DE LEONES 2		3100		118	9		-11.5	-83	6	2.4	3.8	1	1.6	43.1	5.3	Jan-89
32	TUNEL DE MONTE ALEGRE		3500	457.8		9		-11.8	-77	6.1	2.4	2.8		1.4	37.7	7.1	Jan-89
33	POZO CASTAÑEDA 5		2330	289.6		46		-9.9	-64	4.8	1.4	46.2	11.5	5.9	146.3	6.4	Jan-89
34	CUARTO DINAMO		3150	67.2		10		-11.4	-72	11.8	11.5	7.2	1.5	8.2	56	1.5	Feb-87
35	EL ZARCO 1	0.5	2810		80	12.5	5.75	-10.9	-75								Sep-88
35b	EL ZARCO 2	0.6	2900					-10.04	-70.7								May-91
36	PEÑA POBRE		2290	133.2		12		-10.8	-72	9.2	5.5	8.3	3.2	5.8	52.7	18.8	Jan-89
37	VALLE DEL CONEJO		3200			12		-10.4	-72	4.7	4.6	6.5	1.5	0.7	62.6		Jan-89
29	VALLE CARBONERA		3060		60	11	6.8	-9.9	-71								apr-91
38	CIPRES OJO DE AGUA		2500	202.2		13		-10.9	-74	10	5.1	8.3	2.9	1.8	77.7	6.4	Jan-89
43	SAN FRANCISCO	1	2720		350	12.5	6.45	-10.47	-72.9								Jun-91
44	EL GUARDA	0.25	2830		130	12	6.25	-9.93	-70.5								Jun-91
45	RIO TLALNEPANTLA	0.2	2690		110	18	6.65	-10.17	-68.4								Jun-91
48	PALOMAS M.A.	0.4	3360		46	10		-10.7	-73								Jul-88
39	VIVORILLAS 1	0.45	3048		65	14.5	6.4	-10.52	-73.6								May-91
40	VIVORILLAS 2	0.4	3085		87	11.2		-11.19	-77.4								May-91

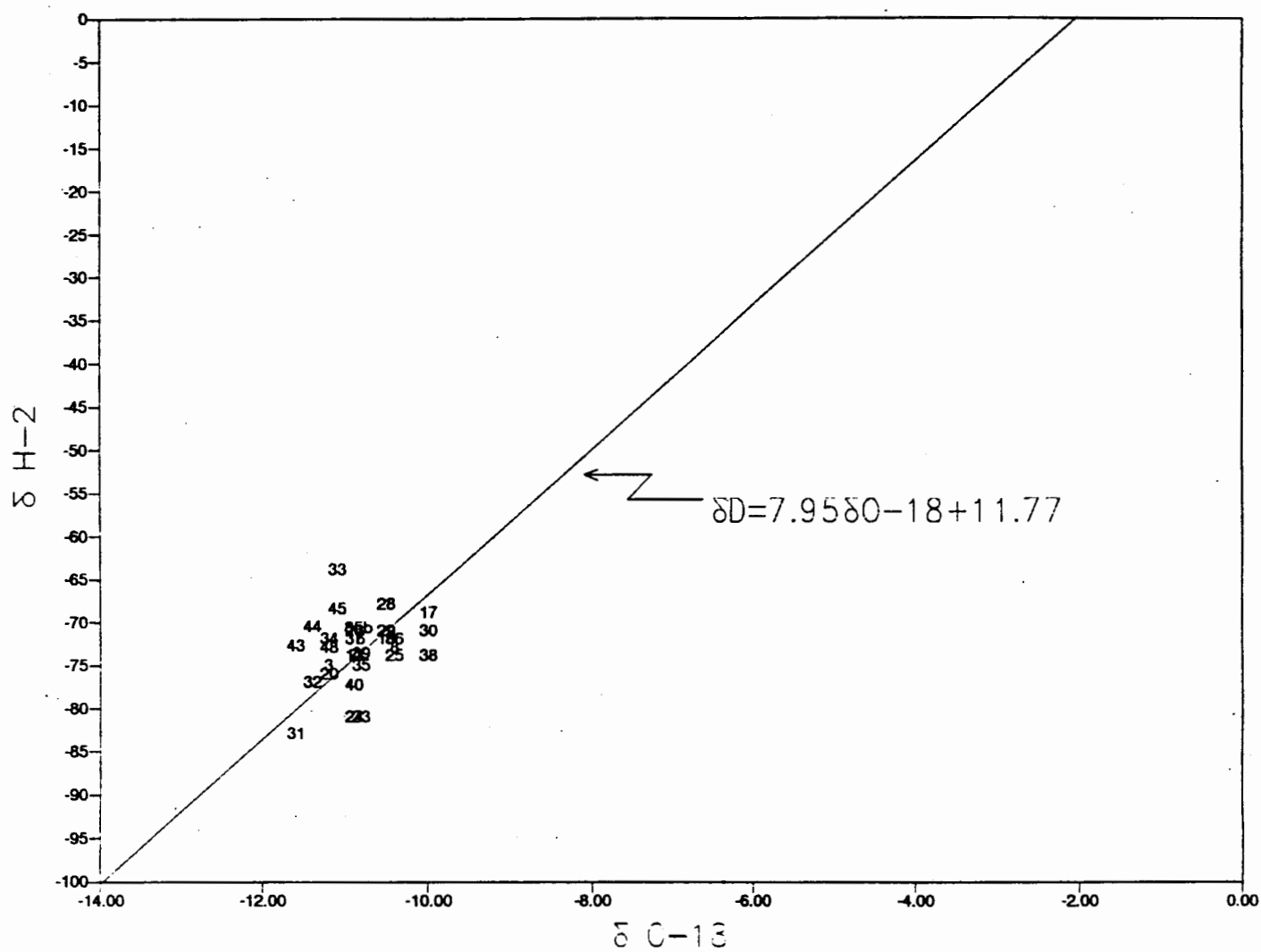


FIGURA 7 OXIGENO-18 VS DEUTERIO DE LOS MANANTIALES

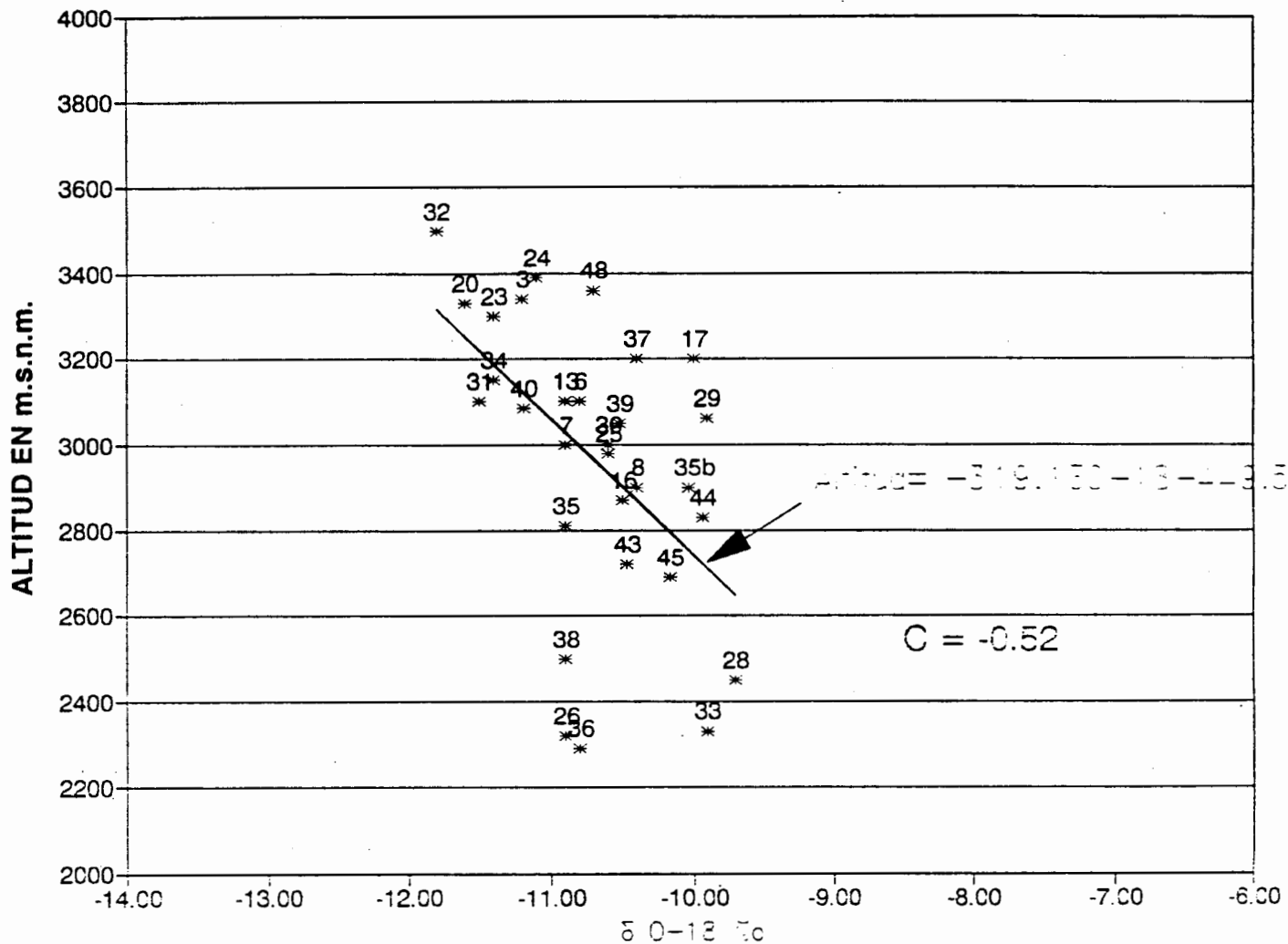


FIGURA 3 ELEVACION VS O-18

-Este comportamiento isotópico uniforme con respecto a la altitud en la zona de recarga, nos permite emplear como trazadores, los isótopos estables. Es decir que, al relacionar las altitudes de recarga con el contenido isotópico y conocer los valores de estos isótopos en pozos en la zona de descarga, se podrá contar con argumentos para definir un modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.

Altitud vs STD

Se realizó una gráfica en la que se relaciona el contenido de sólidos totales disueltos con la altitud, con el fin de comprobar si la hipótesis anterior se cumple para todos los datos disponibles. Sin embargo, como puede verse en la figura, para los manantiales que cuentan con análisis físico-químico, se observa que al menos para las muestras 33, 38 y 28, el agua subterránea ha viajado más tiempo o a mayor profundidad a través del acuífero.

No obstante lo anterior, el resto de las muestras presenta un valor de STD muy bajo, aspecto que apoyaría los argumentos obtenidos de la interpretación de los datos isotópicos.

Evolución hidrogeoquímica de los manantiales

En la figura 10 se muestran los datos químicos de los manantiales siguientes: A) Ajolotes; B) Taza Vieja; C) La Saucedá; D) El Sauco; E) Santa Fe; F) P. De Leones; G) Túnel de Monte Alegre; H) Pozo Castañeda 5; I) Cuarto Dinamo; J) Peña Pobre; K) Valle del Conejo; y L) Cipres Ojo de Agua.

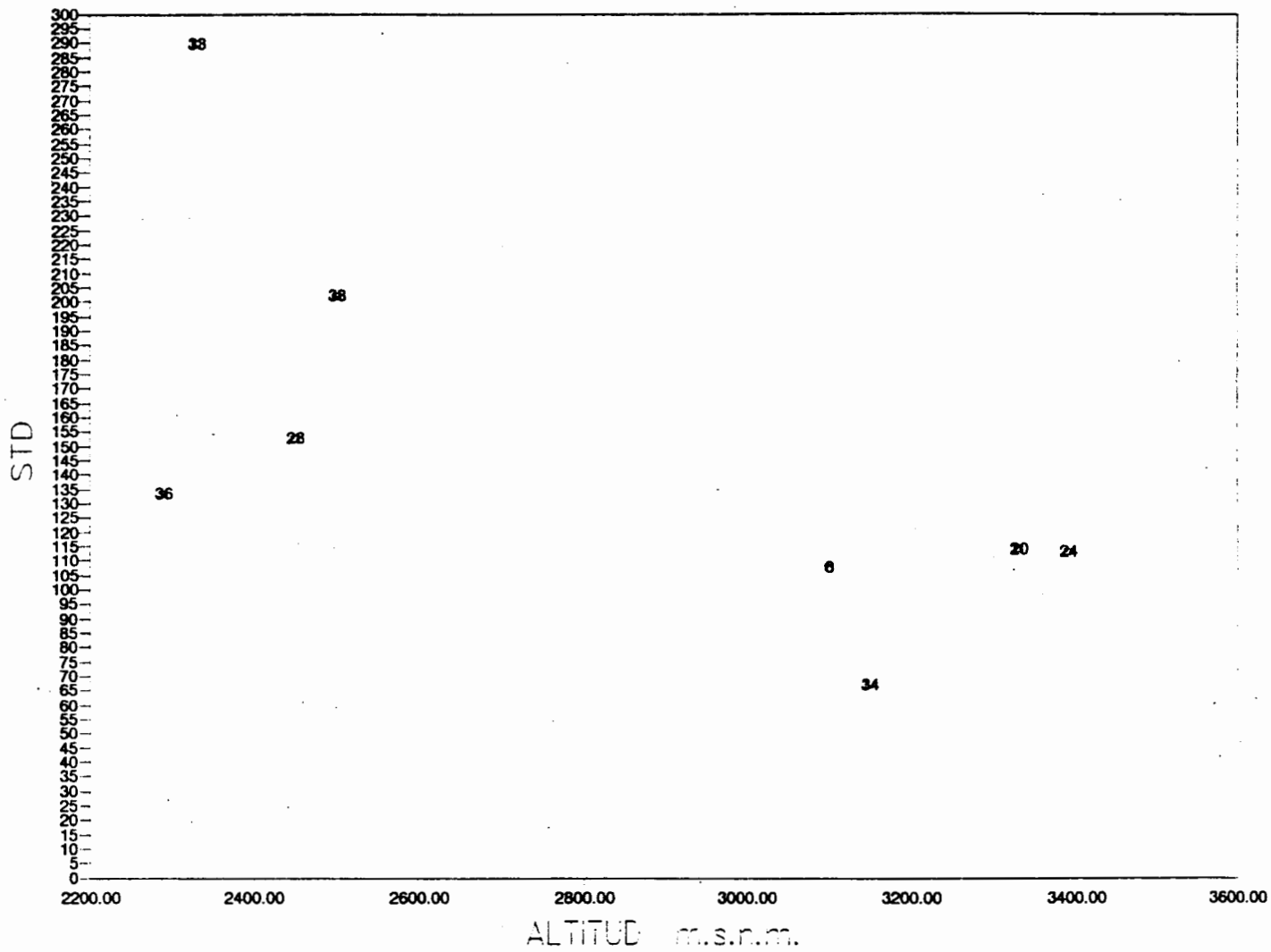
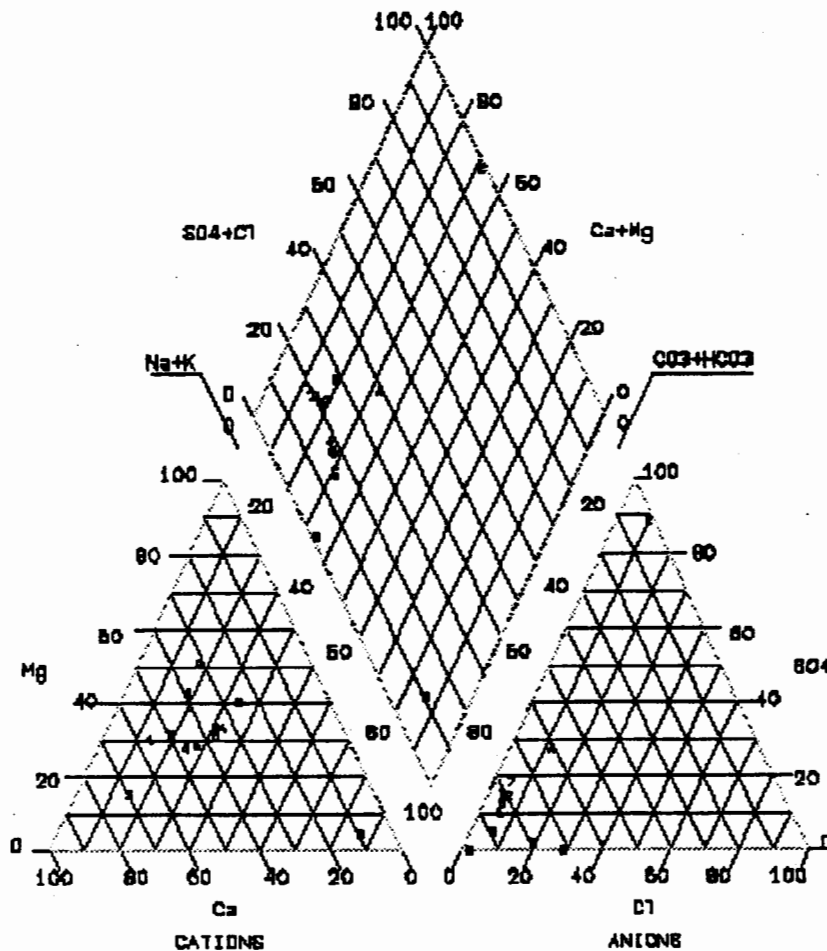


FIGURA 9 STD-ALTITUD

FIGURA 10 DIAGRAMA DE PIPER



De acuerdo con el concepto de las facies hidrogeoquímicas de Back (1961), se clasificaron los manantiales que cuentan con datos químicos como pertenecientes a una facies $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, con variaciones entre la facies $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ y la $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ de la siguiente manera:

Facies $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$

A esta facies pertenecen los manantiales: Ajolotes, La Sauceda, Santa Fe, y Cuarto Dinamo.

Facies $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$

Los manantiales que presentan esta facies son: Taza vieja, El Sauco, P. De Leones, Túnel de Monte Alegre, Peña Pobre y Ciprés Ojo de Agua.

Facies $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$

Esta facies solo la presenta el manantial del Valle del Conejo.

La facies hidrogeoquímica de acuerdo con la evolución propuesta por Chevotarev (1955), corresponde con la que presentan las aguas subterráneas que se encuentran en las zonas de recarga.

Las facies $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ y $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$, son las que se esperan dada la composición de las rocas y suelos de la Sierra de las Cruces que en su descomposición producen arcillas Montmorilloníticas e Ilíticas, que reaccionan en la zona intermedia del suelo, misma que se ha observado de espesor considerable en la Sierra, sobre todo en las porciones altas.

En cuanto a la facies $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$, podría explicarse de acuerdo con las condiciones de descarga observadas en el manantial que la presenta, el cual está formado o se encuentra en contacto con una zona intermedia de un espesor importante (1.8 m), con gran capacidad de almacenamiento, en el que se llevan a cabo las reacciones: Hidrólisis de minerales primarios y la síntesis de minerales arcillosos, dando como consecuencia una concentración de Na mayor.

Considerando los resultados antes expuestos sobre la composición química de los manantiales se concluye lo siguiente:

-El agua Subterránea de la Sierra de las Cruces corresponde de acuerdo a su contenido químico, a la que es típica de zonas de recarga en terrenos volcánicos.

-El contenido de STD y las conductividades eléctricas medidas en campo, indican que la mayor parte de las descargas naturales de la Sierra, son de recarga local o cercana, con excepción de algunos manantiales que presentan composiciones que pertenecen a agua que ha circulado más tiempo o más distancia a través del patrón de flujo.

Relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas en los manantiales

Se analizaron los datos hidrométricos de 25 manantiales que fueron medidos por el DDF en los años de 1984 y 1985, con el fin de obtener argumentos sobre el régimen de flujo de las descargas naturales y conocer su relación con la recarga al sistema acuífero.

Los datos hidrométricos fueron graficados en forma semilogarítmica, considerando caudal contra tiempo, asimismo, para fines de análisis, se consideró la precipitación en la estación climatológica más cercana para el mismo período, con lo que puede verse la influencia de la precipitación en la descarga.

Del análisis de los datos obtenidos, se caracterizaron los tipos de manantial en función de su comportamiento hidrométrico en relación con la precipitación, el tipo de unidad hidroestratigráfica en la que se encuentra, y el tipo de manantial de la clasificación propuesta. Con este análisis se concluye lo siguiente:

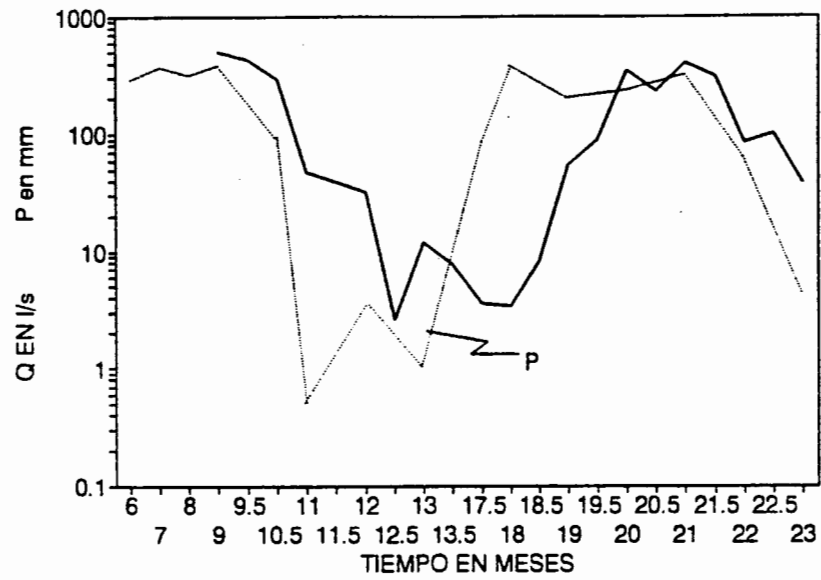
-Se observan dos tipos generales de comportamiento de los hidrogramas: uno que manifiesta el efecto de la precipitación, aunque con cierto retardo en algunos casos, y otro que es muy poco influido por la precipitación.

-Los hidrogramas que son influidos por la precipitación, pertenecen en gran parte a la unidad hidroestratigráfica de las secuencias de lavas y piroclásticos de las formaciones Tpc y Tpo, lo que se atribuye a que dichos manantiales tienen una menor zona de captación, a que se encuentran en las zonas de mayor recarga, y al comportamiento hidráulico del medio fracturado presente.

-Los hidrogramas que son poco influidos por la precipitación indican que estas descargas se encuentran en gran parte en manantiales del tipo 3, es decir en fracturas, o en contactos entre dos unidades hidrogeológicas, aspecto que indica mayor tiempo de residencia en el acuífero.

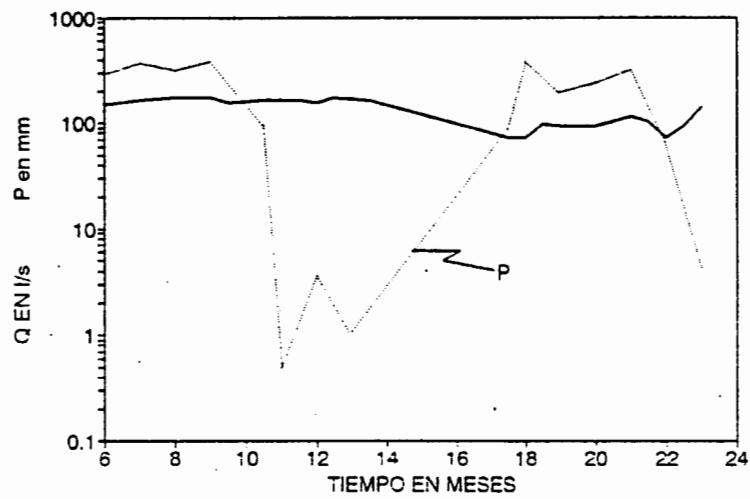
En las figura 11 se muestran ejemplos representativos de manantiales de los dos tipos mencionados arriba.

MANANTIAL P. DE LEONES



11(A)

MANANTIAL EL PARTIDOR



11(B)

FIGURA 11 HIDROGRAMAS DE MANANTIALES REPRESENTATIVOS

El manantial No. 5 - Presa de Leones- (figura 11a) representa los manantiales influidos por la precipitación. Este manantial se encuentra en una fractura erosionada que descubrió el contacto entre las lavas y los piroclásticos de las partes altas.

El manantial No. 7 El Partidor (figura 11b), se encuentra en las secuencias de piroclásticos y lavas, además que se descarga en la traza de una fractura maestra.

Los resultados de este análisis indican que en 12 de los 25 manantiales estudiados se manifiesta de manera muy pronunciada el efecto de la precipitación (manantiales: Tulmiac, Rancho Viejo, El Sauco, P. de Leones, Monte Alegre, Vivorillas, A. Grande, Chichicarpa, Las palomas SC, La Rosita, Sta. Rosa Xochiac, A. de Peñas), aspecto que indica que los acuíferos que descargan son superficiales, o se encuentran fuertemente influidos por la recarga.

Para evaluar la relación de las fracturas maestras y las fallas sobre la ocurrencia de las descargas naturales se realizó un mapa estructural en el que se incluye un análisis estadístico de la orientación de los lineamientos principales (figura 12). En este mapa se observa que una proporción casi del 50% de los manantiales cae sobre la traza de alguna fractura maestra, o en el cruce de dos de ellas. Esta correspondencia entre las descargas naturales y las estructuras se debe a que las estructuras juegan un papel importante en el funcionamiento del sistema acuífero, al menos al nivel de la zona de recarga, pues la proporción de lavas andesíticas que es relativamente alta con respecto al total de la masa de la sierra, favorece esta situación.

Es factible que el agua circule a través del fracturamiento principal, como lo demuestran las orientaciones dominantes, que coinciden con manantiales, las cuales tienen dos direcciones principales, como puede observarse en las rosetas de fracturas de la figura 12.

DISCUSION DE RESULTADOS

De acuerdo con los datos geológicos, isotópicos y fisicoquímicos, se considera que las zonas de captación de los manantiales de las porciones altas de la Sierra de las Cruces, corresponden con el parteaguas hidrológico más cercano en la mayor parte de los casos, pues son alimentadores de las corrientes perennes que fluyen pendiente abajo. Sin embargo, estas descargas que en total suman casi 300 en toda la extensión de la sierra, alcanzan un caudal importante, considerando que en los 50 manantiales aquí estudiados, se descargan en total alrededor de 950 l/s. Este caudal a pesar de ser elevado, no puede restarse directamente del agua infiltrada, pues como pudo observarse en el campo, muchas de las cuencas de las porciones altas, tienen un régimen de alimentación, es decir, las corrientes aportan agua a los acuíferos. Entonces sería necesario medir el valor de esta infiltración. Dicho fenómeno que ocurre en las cuencas de las partes altas que presentan condiciones de régimen influente, se manifiesta en gran parte de los arroyos que fluyen sobre las unidades de las secuencias de lavas y piroclásticos, en los que el régimen es influente después de la descarga del o los manantiales principales. Aspecto debido a que la disección del relieve causa manantiales, pero cuando la corriente alcanza capas de rocas más permeables, esta retorna al subsuelo.

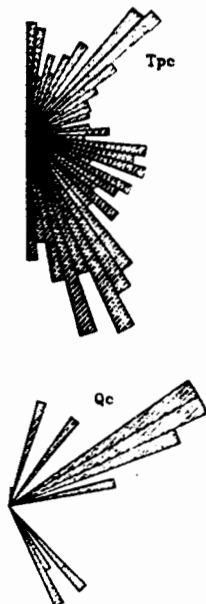
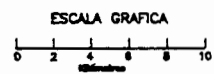
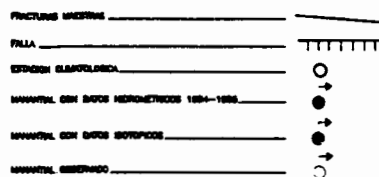
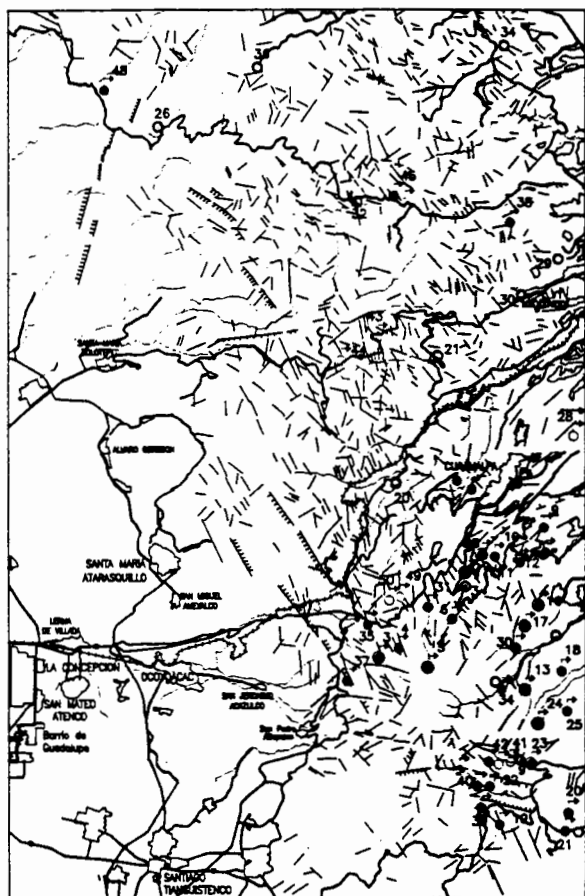


FIG. 12 RELACION DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS CON LOS MANANTIALES.

Se ha observado también, que la mayor parte de las cuencas de la porciones altas, al pasar a otra unidad hidroestratigráfica, cambian de régimen hidrológico aguas abajo y son alimentadas por otras descargas naturales, mismas que corresponden a capas saturadas inferiores, que son recargadas en zonas de captación cercanas a dichas descargas.

Las corrientes, fluyen a través de cañadas que disectan el relieve, en gran parte se encuentran localizadas sobre la traza de fracturas maestras.

Modelo conceptual

El sistema acuífero en la sierra tiene el siguiente comportamiento:

El agua se infiltra principalmente en las tormentas que caen de Junio a Octubre. En dichas tormentas, se presenta una gran aportación de agua al sistema, misma que al ser infiltrada, pasa por la zona de retención, en donde una parte se queda retenida y otra se infiltra junto con una proporción del agua antes retenida, hasta alcanzar el acuífero. Este fenómeno, ocurre de manera similar en al menos toda el área de afloramiento de la unidad hidrogeológica de las secuencias de lavas y piroclásticos de las formaciones Tpo y Tpc, pues presentan las mayores zonas boscosas, con espesores de suelo de 0.50 a 2 m de espesor, en altitudes mayores a los 2500 msnm. En estos sitios, la zona de retención juega un papel muy importante en cuanto a la composición química del agua subterránea, así como en la circulación de la misma, pues en algunos lugares actúa como acuífero a lo largo de algunos metros.

El agua infiltrada fluye a través de las capas más permeables y a lo largo de un sistema de fracturas maestras que afecta toda la columna estratigráfica de la sierra. Es entonces a través del fracturamiento, que el sistema es recargado en su conjunto, pues las fracturas drenan el sistema multicapa de las partes altas de la sierra, mientras que en algunos puntos, en los que la disección del relieve alcanza dos capas de distinta permeabilidad, o cuando una fractura afecta a una unidad en distintas condiciones geológicas, ocurre una pequeña descarga de agua subterránea.

La heterogeneidad de materiales que presenta esta sierra, tanto lateral como verticalmente, ocasiona que el agua subterránea esté influenciada grandemente por las discontinuidades litológicas y estructurales, razón por la cual, no puede ser analizada en conjunto como un medio poroso homogéneo, como se ha hecho hasta ahora, pues existen distintos niveles potenciométricos y las fracturas favorecen el flujo en direcciones dominantes.

No obstante lo anterior, se considera que también el agua se comunica a través de las capas permeables y semipermeables, pues a lo largo de una capa poco permeable a la distancia de de unos cuantos kilómetros, pasa a ser una capa permeable, mientras que en otros casos, ocurre lo contrario. Todo esto ocurre por la heterogeneidad de las rocas de origen volcánico explosivo, de que está formada la sierra en su conjunto.

La heterogeneidad antes mencionada, se manifiesta también al pie de la sierra y continúa a lo largo de los acuíferos en explotación en la Ciudad de México. Esto pudo corroborarse al contar con datos de 1990 y 1991 de la elevación del nivel estático de los pozos de la red piloto (de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF), mismos que fueron analizados mediante una interpolación computarizada basada en el método geoestadístico de Kriging. La configuración de ambos años fue similar, por tal razón solo se presenta la más reciente en la figura 13, en donde se observan las diferencias tan marcadas en la elevación del nivel estático, para pozos muy cercanos. Las profundidades de los pozos de la red piloto varían aproximadamente entre los 80 y 250 m de profundidad, cuentan con ademe ranurado

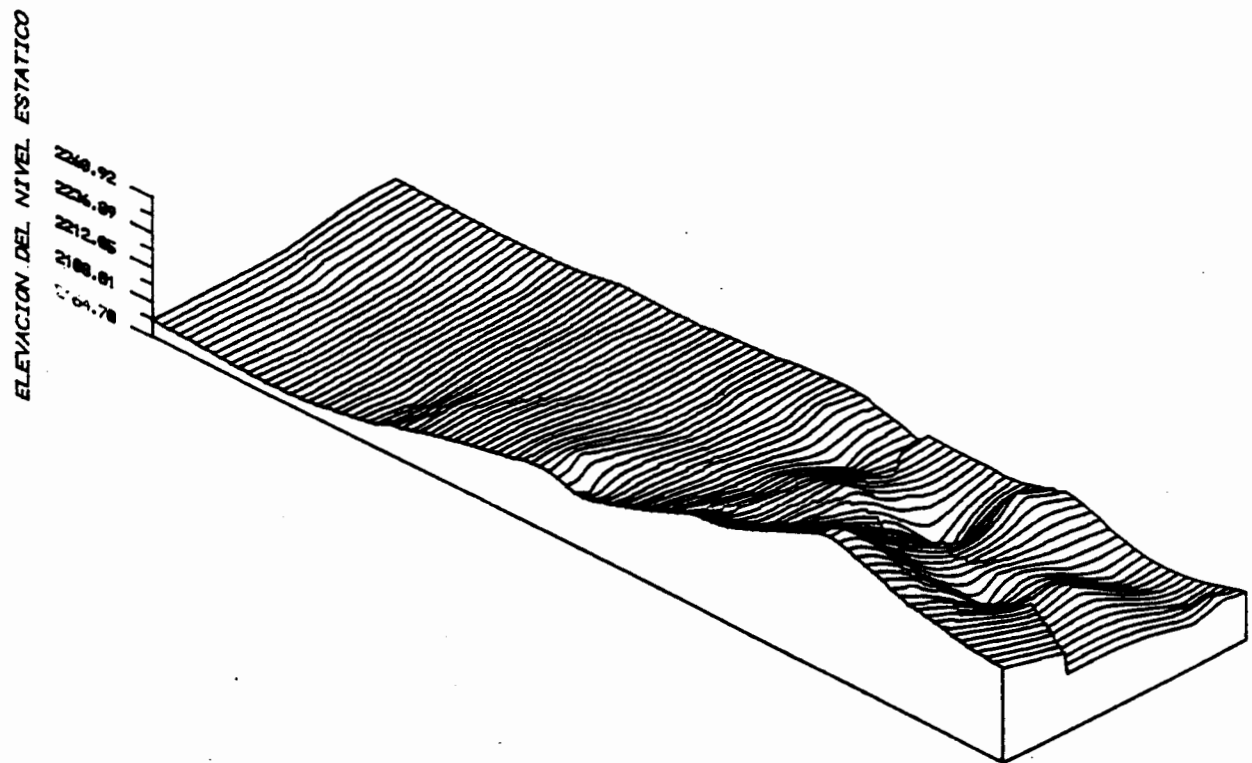
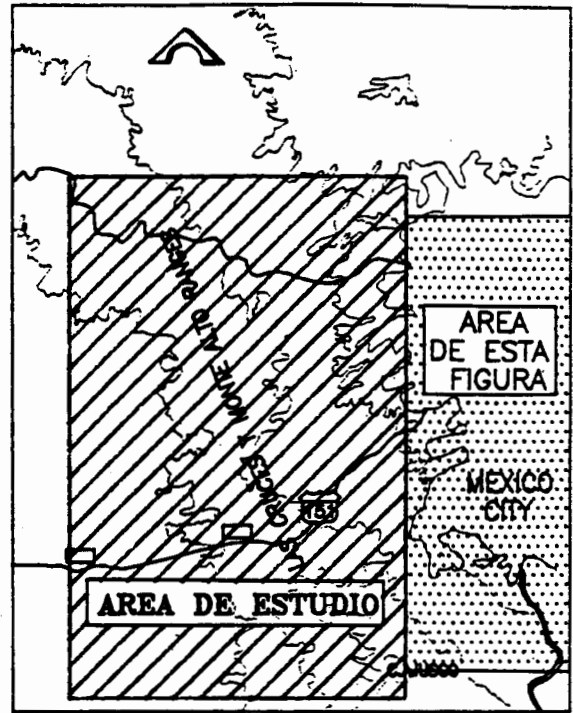


FIGURA 13. ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO 1991

en distintas profundidades y atraviezan litologías distintas, lo que comprueba lo observado en la Sierra a nivel de afloramiento.

Estimación de la Recarga

La estimación de la recarga que aquí se presenta, está basada en la hipótesis y resultados arriba expuestos, pero no deja de ser una estimación gruesa, pues para precisarla más, sería necesario realizar un proyecto específico para cuantificar la recarga que incluya mediciones en el campo.

El método que se presenta a continuación para la estimación de la recarga de una porción de la Sierra de las Cruces, es un balance hidrológico que considera algunos criterios obtenidos de los resultados de esta investigación.

Primeramente se procedió a recopilar la información climatológica de la SARH de 1956 a 1985 para todas las estaciones meteorológicas existentes en esta porción de la Cuenca de México. Acto seguido, se preparó una base de datos en la que se obtuvieron las medias anuales, tanto para la precipitación como para la temperatura. Al revisar las estaciones con datos, se eligieron las que se presentan en la figura 14, por ser las que cuentan con el mayor número de años con datos y ser las más representativas. Una vez obtenida la media anual de ambos parámetros, se calculó la evapotranspiración empleando el método empírico de L. Turc (Castany, 1971), por considerarlo el que podría dar los datos más aproximados pues ha sido probado en distintos tipos de climas en varias partes del mundo y al no contar con datos sobre los parámetros que requieren otros métodos más precisos, se consideró el más adecuado para esta estimación.

La estimación del coeficiente de escurrimiento en esta área, se realizó a partir de un análisis de intensidad de las tormentas registradas en la Estación meteorológica "Presa Iturbide", ubicada muy cerca del parteaguas hidrológico. La información de dicha estación es la que se considera más representativa de las condiciones meteorológicas existentes en las mayores altitudes de la Sierra. Cabe mencionar que su ubicación se halla muy cercana a la Cuenca Las Palomas, zona donde se realizó en 1988, un estudio de escurrimiento de tormentas cuyos resultados han sido de mucha ayuda para el presente estudio (Cortés, et.al.1989b), pues en dicho trabajo se concluye que el 95 % del agua precipitada se infiltra.

Con la información del año 1983, obtenida del pluviógrafo de esta estación, se analizaron las intensidades de lluvia en milímetros por hora, para diversos tiempos de duración, y para cada tormenta del mismo año. Dicho análisis consistió en elegir aquellas tormentas cuya duración, intensidad y milímetros de lluvia acumulados, fueran equivalentes o de mayor magnitud a los registrados en el experimento de la Cuenca Las Palomas arriba mencionado. Los resultados obtenidos de dicho análisis se enuncian a continuación.

El pluviógrafo de la estación "Presa Iturbide" (SARH, 1984) registró en 1983, un total de 46 tormentas, con duración promedio de 170 minutos en los que se acumularon un promedio de 143 mm de lluvia. Esto equivale a una intensidad constante de 5 mm llovidos por hora. Al comparar esta tormenta con la estudiada en la Cuenca Las Palomas, la cual tuvo una duración de 180 minutos con acumulación de 6.3 mm de lluvia en total (equivalente a una intensidad de 2.1 mm de lluvia constante durante una hora), se advierte que la tormenta promedio de la estación Presa Iturbide es del doble de magnitud de la que se midió en 1989 en "Las Palomas".

Cabe aclarar que en el año que fué analizado para la Estación Presa Iturbide, se registraron tormentas de mucho mayor magnitud que el valor promedio, como la ocurrida el 3 de Ago. de 1983, en la que se alcanzaron 16.3 mm de agua en solo 50 minutos.

Finalmente, el total de lluvia registrada en 1983 para la estación analizada (Presa Iturbide) fué igual a 1416 mm. De estos, 650.2 mm fueron aportados por las 46 tormentas más fuertes del año, lo cual equivale al 46 % total precipitado en el mismo. Extrapolando pues, los resultados obtenidos de la Investigación realizada en la Cuenca Las Palomas, donde se determinó un coeficiente de escurrimiento aprox. igual al 5%, se concluye que en las partes altas de la Sierra de las Cruces el coeficiente de escurrimiento podría considerarse del 5% de la precipitación.

Finalmente se procedió a aplicar el método que parte de lo siguiente:

-El área de mayor infiltración la forman los afloramientos de la unidad hidroestratigráfica de las secuencias de lavas y piroclásticos de las formaciones Tpo y Tpc. Por lo tanto a esta áreas, que fueron medidas sobre un mapa geológico escala 1:50 000 mediante un programa de computadora, se les asignó un coeficiente de escurrimiento de 0.5 y una precipitación obtenida de la media aritmética de las estaciones climatológicas que quedan dentro de su área de afloramiento.

-El resto del área que en su mayoría está formada por afloramientos de la unidad de las secuencias de piroclásticas de las formaciones Otomí y las Cruces, se consideró como una sola unidad y se le asignó una precipitación que es la media aritmética de las estaciones que quedan dentro de esta área. El coeficiente de escurrimiento es de 0.10 tomado del que consideran Ortega y Farvolden (1989) para toda la Sierra. Es conveniente mencionar el hecho de que en las partes altas de esta unidad los materiales piroclásticos contienen más porcentaje de partículas gruesas y se encuentran cubiertas por suelo y vegetación similar a la de las secuencias de lavas y piroclásticos, aspecto que las hace más favorables para la infiltración, mientras que las áreas bajas, están cubiertas por cenizas poco permeables con escasez de suelo y de vegetación, lo que las hace poco favorables. Por lo tanto la generalización adoptada podría considerarse que toma en cuenta el equilibrio entre estos dos extremos.

Adicionalmente, a lo anterior, al total obtenido de este balance que es de 466.1 millones de $m^3/año$, se le restan 30 Millones de $m^3/año$, correspondientes a la descarga de aguas subterráneas en la zona de recarga, haciendo un poco conservada la estimación, pues parte de esta descarga se vuelve a infiltrar al sistema.

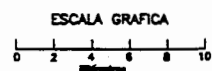
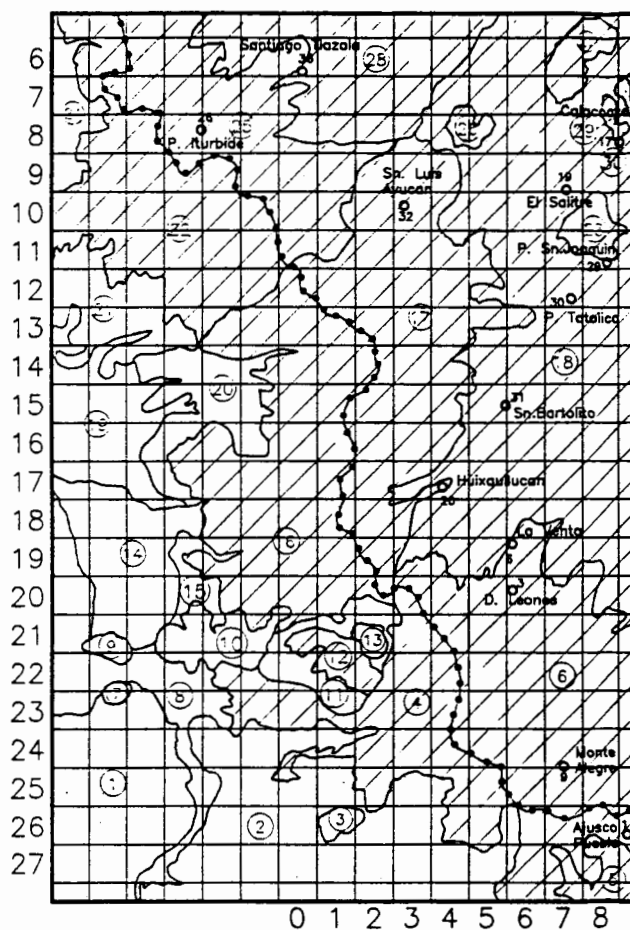
Las áreas consideradas para la estimación, las estaciones climatológicas y la malla del modelo numérico de Herrera et.al. (1989), se muestran en la figura 14 y en la tabla 6.

Los resultados del balance se muestran en las tablas Va y Vb.

Del resultado de esta estimación, se deriva lo siguiente:

-Considerando que el parteaguas subterráneo se localiza desplazado hacia el Valle de Lerma, como lo indican Ortega y Farvolden (op.cit.), se consideró para el cálculo toda el área de afloramiento de las secuencias superiores de lavas y piroclásticos.

-El valor que se obtiene de agua infiltrada es de $14 m^3/s$, que resulta lógico considerando que se extraen alrededor de $50 m^3/s$ de la porción superior del sistema acuífero de la Cuenca de México, tomando en cuenta todos los pozos del sur de la misma, pertenecientes a distintas subcuencas y considerando agua procedente de otras zonas de recarga principales como son la Sierra Chichinautzin y la Sierra Nevada. Adicionalmente a lo anterior, debe considerarse que esta recarga también aporta agua a los acuíferos profundos, que no están en explotación.



ESTACION CLIMATOLOGICA _____ 26
P. Iturbide

• NUMERO DE AREA DE AFLORAMIENTO DE
UNIDAD HIDROESTRATIGRAFICA _____ 15

PARTEAGUAS SUPERFICIAL _____

AREA DE BALANCE _____

• Consultar el valor de cada área en el texto.

FIG. 14 MAPA DE AREAS DE AFLORAMIENTO PARA CALCULO DE INFILTRACION

TABLA V.A. DATOS EMPLEADOS EN EL CALCULO DEL BALANCE DE AGUAS SUPERFICIALES PARA LA ZONA DE MAYOR ALTITUD EN LA SIERRA.

Como se observa en la figura 14, dentro de esta zona se encuentran las ocho estaciones de la presente tabla.

ESTACION	P en mm	ETR en mm
SANTIAGO TLAZALA	1200	616
PRESA ITURBIDE	1601	507
SAN LUIS AYUCA	1215	671
HUIXQUILUCAN	1124	650
LA VENTA	1327	603
DESIERTO DE LOS LEONES	1294	559
MONTE ALEGRE	1327	498
AJUSCO PUEBLO	1165	570
PROMEDIO	1282	584

Este cálculo considera un factor de escurrimiento igual al 5%.

LO ANTERIOR SE OBTIENE DE LA FORMULA:

$$I = (P - ETR - ESC) S$$

Donde I= Infiltración

P= Precipitación

Esc= Escurrimiento

S= superficie en m² correspondiente a la suma de todas las áreas comprendidas dentro de la "unidad hidrogeológica de lavas y piroclásticos"(números: 25, 22, 17, 16, 12, 4, y 6; de la Figura 14).

TABLA V.B. DATOS EMPLEADOS EN EL CALCULO DEL BALANCE DE AGUAS SUPERFICIALES PARA LA ZONA DE MENOR ALTITUD EN LA SIERRA.

Como se observa en la figura 14, dentro de esta zona se encuentran las cinco estaciones de la presente tabla.

ESTACION	P en mm	ETR en mm
CALACOAYA	804	624
EL SALITRE	820	593
PRESA SAN JOAQUIN	925	644
PRESA TOTOLICA	931	640
SAN BARTOLITO	990	628
PROMEDIO	894	626

Para esta zona se consideró un factor de escurrimiento igual al 10%

LO ANTERIOR SE OBTIENE DE LA FORMULA: $I=(P-ETR-ESC)S$

P= Precipitación

Esc= Escurrimiento

I= Infiltración

S= superficie en m² correspondiente a la suma de todas las áreas comprendidas dentro de la "unidad hidrogeológica de secuencias de piroclásticos y tobas" números 28, 26, 27, 29, 30, 23, y 18; de la Figura 14).

TABLA NO. 6
RELACION DE AREAS POR AFLORAMIENTO DE UNIDAD HIDROGEOLOGICA
ESTA TABLA ESTA REFERIDA AL MAPA 14 DE ESTE ESTUDIO

RELACION DE AREAS POR AFLORAMIENTO DE UNIDAD HIDROGEOLOGICA
ESTA TABLA ESTA REFERIDA AL MAPA 14 DE ESTE ESTUDIO

[illegible]

CONCLUSIONES

Los manantiales de las partes altas de la Sierra de las Cruces se deben a la descarga parcial de un sistema multiacuífero, el cual está afectado por numerosas fracturas y fallas con arreglos de fracturas definidos y que afectan toda la columna hidroestratigráfica de la Sierra.

Considerando el marco geológico y estructural de la Sierra de las Cruces, las numerosas observaciones de campo realizadas, los datos isotópicos y químicos, fue posible realizar una clasificación de manantiales, la cual se basa en seis manantiales tipo dentro de los cuales caen todos los que es posible encontrar en dicha Sierra.

Las descargas naturales en la sierra, manifiestan composiciones isotópicas correspondientes prácticamente a la altitud en la que se encuentran, dado que estas están descargando las capas superiores del sistema a distintos niveles, con lo que se descarta la posibilidad de que dichas descargas drenen en los flancos de la sierra, agua infiltrada en las porciones altas. Considerando lo anterior, se concluye que las corrientes que fluyen en los flancos de la sierra, son la consecuencia de un caudal que se va acumulando debido a la descarga de manantiales a distinta altitud, que pertenecen a acuíferos distintos.

Lo anterior es la generalidad de los casos, pero existen algunos manantiales en la base de la sierra que pertenecen a la zona de descarga y que manifiestan agua recargada a mayor altitud, pero estos son los que quedan de aquellos que existían en la planicie lacustre antes de la extracción de agua subterránea. La causa de que aún existan, es que forman parte de un sistema que ha sido poco afectado por el bombeo, aspecto que apoya las hipótesis de acuíferos multicapa de este trabajo.

Las facies hidrogeoquímicas identificadas en los manantiales que cuentan con datos químicos, son de una facies $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$, que es coherente con la zona de recarga en un terreno volcánico.

El gran número de manantiales que caen sobre las fracturas maestras y la consistencia de los arreglos de fracturas, corrobora la hipótesis de que el flujo de agua subterránea al menos para la Sierra de las Cruces, está influenciada por estas.

La geología de la Sierra de las Cruces, el origen de los manantiales, y una interpolación de la elevación del nivel estático de los acuíferos en explotación en el flanco poniente de la sierra, demuestran que el sistema acuífero en la zona de descarga, al igual que en la zona de recarga, funcionan como un sistema multicapa.

De acuerdo con los resultados obtenidos puede considerarse que la mayor parte de la recarga ocurre en las porciones altas de la Sierra de las Cruces, específicamente en los afloramientos de la unidad denominada: "secuencias de lavas y piroclásticos de las formaciones Otomí y Las Cruces".

La estimación de la recarga obtenida mediante un balance hidrológico que involucra criterios derivados de este trabajo, da como resultado para el área considerada un caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, que es coherente con el funcionamiento del sistema.

RECOMENDACIONES

Considerando las conclusiones a que se llega en este trabajo, se recomienda proteger lo más pronto posible el área marcada en la figura 15. Esta protección será el evitar el avance de la urbanización hacia ambos flancos de la Sierra; prohibir la tala de

árboles; implantar reglamentos para la construcción de fosas sépticas y plantas de tratamiento para las edificaciones ya existentes; hacer una explotación mínima de los manantiales de las partes más altas, explotando los mismos arroyos cerca de las partes bajas, evitando con esto que el agua que retorna al acuífero en las partes altas sea retenida.

Aguas abajo, las corrientes de la sierra se usan como desagüe y llegan a presas reguladoras. Considerando esto, el aprovechamiento de la gran cantidad de agua escurrida podría aprovecharse mediante presas en zonas intermedias, junto con un programa de saneamiento de los poblados situados en las partes altas de la Sierra, e impedir el desagüe en dichas corrientes, al menos hasta la altitud de la presa, con esto se aprovecharía además del agua porcedente de los manantiales, la del escurrimiento.

A pesar de los resultados de este trabajo y de otros similares, no será posible conocer con precisión la recarga en la Sierra de las Cruces hasta que no se instrumente adecuadamente y se midan parámetros confiables, por lo cual se hacen las siguientes recomendaciones:

Se recomienda realizar un proyecto en el que se realicen técnicas experimentales como la escorrentía de Tormentas para la determinación de coeficientes de escurrimiento en otras partes de la zona de recarga. Al mismo tiempo se sugiere la instalación de estaciones climatológicas con instrumentos que permitan aplicar otras técnicas para el cálculo de la evapotranspiración. Dichas estaciones se colocarían en las porciones más altas, cuidando que su distribución complemente las actuales para poder conocer con más precisión el comportamiento de la precipitación en la Sierra. Para ello sería indispensable renovar las actuales estaciones, con los instrumentos necesarios para obtener los mismos parámetros en todas.

Se sugiere la instalación de estaciones hidrométricas en las corrientes principales en sitios que no estén influenciadas por las descargas de aguas negras. Asimismo, se recomienda la instalación de estaciones hidrométricas y meteorológicas en cuencas tipo con fines de experimentación, para de ellas obtener mas argumentos para el conocimiento de los fenómenos hidrológicos que ocurren en la partes altas de la sierra.

La administración de estas estaciones y la interpretación de los datos derivados de ellas sería conveniente que la tuviera el Departamento del Distrito Federal, con apoyo del Instituto de Geofísica la Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de la Ingeniera Xóchitl Montaña Soriano, Dir. Técnica de la Cía. I.G.C., S.A. de C.V., en los trabajos de campo, en la interpretación de los resultados y en la revisión del trabajo. Asimismo al Ingeniero Miguel Alarcón Santiago, Dir. Administrativo de la misma cía., por su colaboración en toda la parte de Ingeniería de Sistemas y por sus valiosas sugerencias. De igual manera a Zayi Montaña Soriano de la misma empresa, por la digitalización de las figuras y mapas. Agradecemos también al Dr. David Rudolph, profesor investigador de la Universidad de Waterloo, sus valiosos comentarios y sugerencias. De igual manera agradecemos a la empresa Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V. (I.G.C., S.A. de C.V.), el uso de su infraestructura de Cómputo, para la digitalización de los mapas, el procesamiento de la información y edición de este trabajo. Por último agradecemos al IDRC del Gobierno de Canadá, y a I.G.C., S.A. de C.V., por el apoyo financiero.

BIBLIOGRAFIA

Back, W. 1961 , Techniques for mapping of hydrochemical facies, U.S. Geological Survey Prof. Paper, 424-D, pp 380-382.

Chebotarev, I.I., 1955, Metamorphism of natural waters in the crust of weathering, Geochim. Cosmochim. Acta, 8, pp. 22-212.

Castany, G., 1971, Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas, Ed. Omega S.A., Barcelona.

Cortés A. and R. Farvolden, 1989, Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, Mexico. Jurnal of Hydrology, 107, pp. 147-153.

Cortés A., R.D. Arizabalo y R. Rocha, 1989a, Estudio hidrogeoquímicos isotópico de manantiales de la Cuenca de México, Geofís. Int. Vol. 28 No. 2, pp. 265-282.

Cortés A., L.R. Jaimes y R.N. Farvolden, 1989b, Hidrología isotópica de la influencia de una tormenta en la recarga natural del agua subterránea en la Sierra de Monte Alto, Geofís. int. Vol 28 No.2, pp. 435-449.

DDF-DGCOH, 1984-1985, datos hidrométricos de manantiales.

DDF-DGCOH (Dirección general de Construcción y Operación Hidráulica del D.D.F.), 1990-1991, Piezometría de los pozos piloto de los años 1990 y 1991, realizadas por al empresa Lesser y Asociados S.A.

Herrera I., R. Martínez, y G. Hernández, 1989, Contribucción para la administración científica del agua subterránea de la Cuenca de México, Geofís. Int. Vol. 28, No. 2, pp. 297-334.

Jaimes-Palomera. L.R., A. Cortés y R.N. Farvolden, 1989, Hidrogeología de la Sierra de las Cruces: unidades hidrogeológicas y recarga, Memoria de la reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, efectuada en Cuernavaca Mor en Nov. de 1989 (resumen expandido).

Jaimes, L.R., 1991, Relaciones agua superficial-subterránea en las porciones altas de la Sierra de las Cruces y su relación con la recarga del sistema acuífero de la Cuenca de México, Informe Interno del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Jaimes L.R, (En preparación), Geología de las sierras de las Cruces y Monte Alto, e los estados de México y Distrito Federal, México.

McDonnel, J.J., 1990, A rationale for old water discharge through Macropores in a steep, humid catchment, Water. Res. Research, Vol. 26, No. 11, pp. 2821-2832.

Mora, G., C. Caballero, J. Urrutia, Sh. Sushimi, Southwarth migration of volcanic activity in the Sierra de las cruces, basin of México? -a preliminary K-Ar dating and paleomagnetic study, Geofís. int. Vol. 30 No. 2, pp. 61-70.

Ortega A., R.N. Farvolden, 1989, Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico, Journal of Hydrology, 110, pp. 271-294.

SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1956-1985, Información Climatológica consultada en el SMM y en los boletines hidrológicos Nos. 30 al 36.

Vázquez, E. y Jaimes L.R., 1989, Geología de la Cuenca de México, Geofís. Int.
Vol. 28. No.2, pp. 133-190.